

基于数据驱动的台区户-变关系核查方法研究

李平¹, 吴伟将², 严永辉¹, 徐博¹, 刘飞¹, 王瑾然³

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 南京 211100; 2. 国网江苏省电力有限公司 电力科学研究院, 南京 210008; 3. 河海大学 能源与电气学院, 南京 211100)

Research on the method of transformer-meter relationship verification based on data-driven

LI Ping¹, WU Weijiang², YAN Yonghui¹, XU Bo¹, LIU Fei¹, WANG Jinran³

(1. Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210008, China; 3. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

摘要:经济的不断发展使得低压配电网的规模日趋庞大,但同时暴露了台区线损管理中的一些问题。台区的户-变隶属关系错误是导致台区线损异常的主要原因之一。为了弥补检修人员需要对所有用户逐户排查方法的缺陷,提出了一种基于数据驱动的台区户-变隶属关系核查的方法。模型利用台区供、用电的历史数据,以台区折算后日线损率最稳定为优化目标,采用长时间尺度下滚动优化的方式,最终给出疑似发生户-变隶属关系错误的用户。最后通过两个实际的案例进行分析,结果表明该模型能够给出疑似档案错误的用户集合,实现台区户-变隶属关系核查的高效化。

关键词:低压台区线损;户-变关系;数据驱动;混合整数规划

Abstract: The continuous development of the economy has made the scale of the low-voltage distribution network increasingly large, but at the same time exposes some problems in the management of the line loss in the transformer areas. The fault of transformer-meter relationship in transformer areas is one of the main causes of abnormal line loss. In order to make up for the shortcomings of maintenance personnel who need to check the methods of all users on a case-by-case basis, a data-driven method for verifying the transformer-meter relationship of the district is proposed. The model uses the historical data of power supply and power consumption in the transformer area, and optimizes the daily line loss rate of the transformer area as the optimization target, and adopts the method of rolling optimization under the long-term scale, and finally gives the user who is suspected to have a transformer-meter relationship error. Finally, by using two actual case studies, the result shows that the model can give a set of users with suspected file errors, and realizes the efficiency of the transformer-meter relationship verification.

Key words: line loss of low-voltage transformer areas; transformer-meter relationship; data driven; mixed integer programming

0 引言

国民经济的迅猛发展加快了中国的城镇化进程。随着城镇建设的不断加速,低压配电网的规模日趋庞大,结构更加复杂,居民和工业的用电需求也呈现大幅度的增长,低压配电台区的线损和供电质量问题也逐渐暴露出来^[1]。如何降低台区线损,强化台区线损精益化管理并推动营销转型升级成为电力营销部门的首要任务^[2]。

对于供电企业和台区管理者而言,辖区内的台

区施工状况参差不齐,且部分用户存在违规用电等行为,为台区的精益化管理和降低线损带来了巨大的难题^[3]。同时,低压配电网建设和发展引起的台区频繁变动(如迁建、线路切割和扩容等)和用户用电地址改变等原因,会直接导致台区内的用户表计和台区变压器的隶属关系发生变更^[4]。若台区户-变隶属关系在用户用电信息采集系统内未得到及时更新或更新错误,将导致电力营销数据异常,直接影响台区线损的考核和整改,甚至引发用户的计量和债券纠纷,造成社会资源和企业财产损失。

目前,电力营销部门大都采用人工现场逐户排查与用户用电信息采集系统相配合的方式来核查与纠正台区的户-变隶属关系。这种方法虽然准确度高,但是逐户排查的效率低,需要耗费大量的人力、物力和财力。目前,已有相关学者和企业人员对户-变隶属关系的核查进行研究。文献[3]提出了

收稿日期:2019-08-16;修回日期:2019-11-30

基金项目:江苏方天电力技术有限公司科技项目(0FW-18553-WF)

This work is supported by Science and Technology Project of Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd. (No.0FW-18553-WF)

采用DS-2018户-变关系识别仪进行逐户核查的方法以解决因户-变隶属关系错误导致线损异常问题。文献[4]分析了台区户-变对应关系不正确的可能成因,为户-变关系核查和整改提供了工程依据。文献[5]则提出了基于神经网络的台区线损异常成因的分析方法,具有将强的实践应用能力。文献[6]设计开发了一个智能化全流程管控模块,以实现台区线损异常的全流程闭环管理,能够有效分析用户档案与现场不相符的问题。上述文献虽然从工程应用的角度提出了台区线损异常的原因并给出了户-变隶属关系错误的核查与解决办法,但是都没有解决需要大量人工辅助核查与逐户排查的问题。

泛在电力物联网概念的提出和应用为核查线损异常台区的户-变隶属关系提供了新的解决思路。作为国家电网公司“三型两网,世界一流”战略部署的重要物质基础,泛在电力物联网拥有的先进末端感知技术与海量用户大数据资源优势,有利于开展针对用户用电行为特征的深入分析,实施精准营销,为用户提供更便捷和智能的电力营销服务。对海量用户档案信息进行数据挖掘,并通过数据驱动设计台区的户-变隶属关系核查算法,以减少人力与物力的投入。本文利用国家电网公司用电采集系统的用户历史用电数据与台区配变供电数据,建立了基于数据驱动的户-变隶属关系核查模型。该模型利用优化算法对历史数据进行挖掘,能够在线分析和辅助核查台区户-变隶属关系,进而为营销部门和检修人员提供疑似的档案错误用户,避免了对居民进行逐户排查,减少了工作量,提升了工作效率。

1 基于数据驱动的户-变隶属关系核查模型

1.1 户-变隶属关系核查模型基本原理

1.1.1 多台区系统框架

在工程实际中,发生台区户-变隶属关系交叉错误的大多为2个台区或3个台区构成的系统。为了使模型更具有通用性,以4个台区共同组成的多台区系统为例进行介绍。该框架可以推广至由更多台区组成的系统中,如图1所示。4个台区分别命名为台区A、台区B、台区C和台区D。每个台区包含的用户总数目分别为 I 、 J 、 M 和 N ,内部用户分别表示为 i 、 j 、 m 和 n 。

假设这4个台区的用户因某种原因(如台区扩建和切割等)发生了用户营销档案错误,即户-变隶属关系错误,导致4个台区的线损皆不达标。

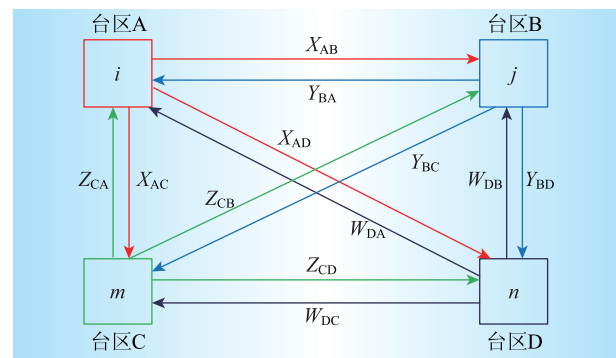


图1 由4个台区组成的多台区系统

Fig. 1 The multi-transformer system consisting of 4 transformer areas

1.1.2 台区用户调整状态的表示方法

为了为检修人员提供疑似的档案错误用户信息以缩小排查范围,使用一组0-1变量(布尔变量)来描述每个台区内用户的调整状态,如图1所示。其中, $X(i)$ 、 $Y(j)$ 、 $Z(m)$ 和 $W(n)$ 分别表示台区A至D中用户调整状态的布尔变量向量。以 X 为例,下角标AB表示用户从台区A调整至台区B,角标BA表示用户从台区B调整至台区A。

当总台区数目为 a 时,布尔变量向量总个数为 $a^2 - a$ 。例如,在由4个台区组成的系统中,共有12个布尔变量向量,每个布尔变量向量的维数分别为其对应台区的用户总数。布尔变量不同0或1的取值能够表示用户的不同调整状态,如表1所示。

表1 布尔变量取值对应表

Table 1 Corresponding table of boolean variable values

情形序号	$X_{AB}(i)$	$X_{AC}(i)$	$X_{AD}(i)$	用户 i 的状态
情形1	1	0	0	调整到台区B
情形2	0	1	0	调整到台区C
情形3	0	0	1	调整到台区D
情形4	0	0	0	保留在台区A

1.2 模型的目标函数

对于一个长期合格且稳定的台区,由于台区的线路参数和拓扑未发生改变,根据线损率与供电量的关系,当将每日的供电量折算到同一个数值时,使用折算后的供电量和居民总用电量计算得到的折算线损率应保持相同。即可以根据相邻两日台区供电量的关系将第 t 日的线损率折算到第 $t-1$ 日,之后以台区户-变隶属关系调整后的线损率波动最小为目标,建立基于数据驱动的户-变隶属关系核查模型。其目标函数可以表示为

$$\min F = \sum_{t=2}^T \sum_{a=1}^{amax} (\delta_{a,t} - \lambda_{a,t} \delta_{a,t-1})^2 \quad (1)$$

式中: t 和 T 分别为日期和所用数据的总天数; a 为台区序号; $amax$ 为系统内台区总数; $\delta_{a,t}$ 为台区 a 在

第 t 日的线损率; $\lambda_{a,t}$ 为台区 a 在第 t 日的折算系数。

1.3 模型的约束

1.3.1 等式约束

模型的等式约束主要包括台区日线损率计算和折算系数计算等,分别如式(2)和式(3)所示

$$\delta_{a,t} = 1 - \frac{W_{\text{CON},a,t}}{W_{\text{DEL},a,t}} \quad (2)$$

式中: $W_{\text{CON},a,t}$ 和 $W_{\text{DEL},a,t}$ 分别为第 t 日时台区 a 的户-变隶属关系调整后所有用户电能表总读数和供电变压器读数。

式(2)中,用户电能表总读数 $W_{\text{CON},a,t}$ 可以表示为

$$W_{\text{CON},a,t} = P_{\text{CON},a,t} - \sum_{k \in a} H_{ak}^T P_{a,t} + \sum_{k \in a} K_{ka}^T P_{k,t} \quad (3)$$

式中: $P_{\text{CON},a,t}$ 为调整前台区 a 内所有用户的电能表总读数,即根据用采系统中的原始户-变隶属关系计算; $\sum_{k \in a} H_{ak}^T P_{a,t}$ 、 $\sum_{k \in a} K_{ka}^T P_{k,t}$ 分别为调出和调入台区 a 的用户读数的总和; $k \in a$ 为与台区 a 发生户-变隶属交叉或错误的台区 k 的集合; H_{ak} 和 K_{ka} 分别为台区 a 和台区 k 对应的布尔变量向量; $P_{a,t}$ 和 $P_{k,t}$ 分别为台区 a 和 k 中用户读数的向量。

台区 A 在第 t 日的线损率可以表示为

$$\begin{aligned} W_{\text{CON},A,t} &= P_{\text{CON},A,t} - \sum_{k \in A} X_{Ak}^T P_{A,t} + \sum_{k \in A} K_{kA}^T P_{k,t} \\ &= P_{\text{CON},A,t} - \sum_{i=1}^I \left(X_{AB,i}^T P_{A,i,t} + X_{AC,i}^T P_{A,i,t} \right) + \\ &\quad \left(\sum_{j=1}^J Y_{BA,j} P_{B,j,t} + \sum_{m=1}^M Z_{CA,j} P_{C,m,t} \right) + \\ &\quad \left(\sum_{n=1}^N W_{DA,j} P_{D,n,t} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

此外,在式(1)中,折算系数 $\lambda_{a,t}$ 的计算方法

$$\lambda_{a,t} = \frac{W_{\text{DEL},a,t}}{W_{\text{DEL},a,t-1}} \quad (5)$$

综上所述,式(2)、式(3)和式(5)共同构成了模型的等式约束。

1.3.2 不等式约束

根据国家电网公司低压台区能耗管理办法的规定,台区日线损率应保持在允许范围内,即

$$\delta_{\min} \leq \delta_{a,t} \leq \delta_{\max} \quad (6)$$

式中: $\delta_{\min}$ 和 $\delta_{\max}$ 分别为合格台区的最小和最大允许线损率。本文中 $\delta_{a,t}$ 的范围在-1.00%到5.00%。考虑到表计误差等因素,根据实际工程情况, $\delta_{\min}$ 取值允许小于零,即允许微负的线损率。

同时,表1中台区用户状态约束可以用式(7)表示,即同一用户的状态只能为保留在原始台区或向单一台区调整。

$$0 \leq \sum_{k \in a} H_{ak,i} \leq 1 \quad i=1,2,\dots,I \quad (7)$$

2 模型的求解

2.1 MIQP问题的求解

本文所建立的基于数据驱动的户-变隶属关系核查模型可以表示为一个典型的优化问题,即

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}) \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \\ \underline{\mathbf{g}}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \bar{\mathbf{g}}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (8)$$

式中:模型的未知变量包括所有台区中每个用户调整状态的布尔变量以及调整后各台区的线损率。

由于目标函数(1)中含有二次项,且等式约束和不等式约束皆为线性方程,因此该模型实质为一个目标函数中具有二次项的混合整数规划问题(mixed-integer quadratic programming, MIQP)。MIQP问题实质是一个N-hard问题^[7],目前的主要求解算法包括有分枝定界算法(branch and bound, B&B)、演化算法和模拟退火等^[8]。本文采用GAMS商业仿真平台对上述模型进行搭建与计算。PC配置为Intel i5-2120, RAM为8 GB。其中,MIQP问题调用GAMS中CPLEX求解器进行求解,CPLEX求解器采用B&B算法求解MIQP问题。B&B算法通过放松决策变量中部分或全部整数约束限制,将原问题转化为一系列的二次规划问题(quadratic programming, QP)进行求解,最终得到符合整数约束条件的MIQP问题的解^[9]。

2.2 长时间尺度下滚动优化方法

由于同一用户的日用电量会受到季节变化、人口数目和作息变化等因素影响,若只对一个时段进行优化计算会产生较大的误差,且会遗漏需要调整的用户。因此,采用长时间尺度下滚动优化的方式,将历史数据划分为多个时段,每次取不同的起始日期和时长进行多次求解,如图2所示。

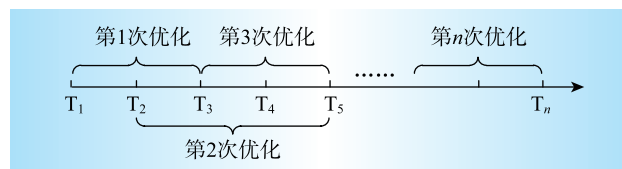


图2 长时间尺度下滚动优化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rolling optimization under a long-time scale

从图2可知,对每个所选择的时段进行优化后都能够得到一组户-变隶属关系的疑似调整方案。营销部门和检修人员在确定需要进行核查的用户编号时,可以对上述所有方案得到的疑似用户取并集,以得到最终的核查方案。这样可以避免因用户用电特性差异导致的核查遗漏问题。

2.3 模型求解的流程

本文提出的基于数据驱动的户-变隶属关系核查模型的求解流程如图3所示。

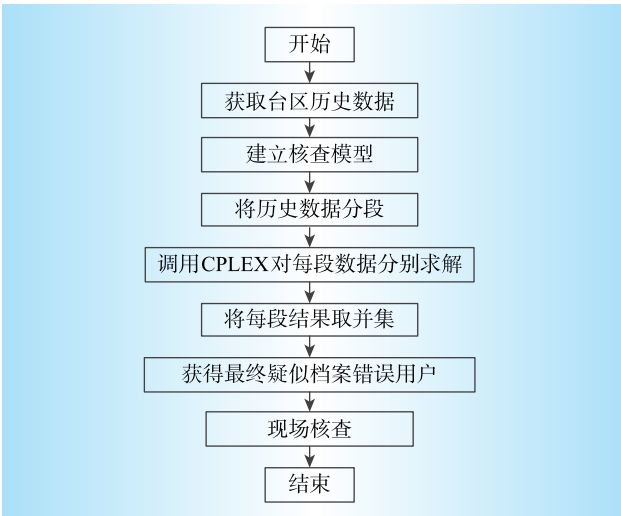


图3 模型的求解流程

Fig.3 The solution flow of the model

3 案例分析

为了验证模型的可行性与合理性,将对南方某城市的2个实际案例进行分析。案例的所有信息皆来自于该台区所在城市的用户用电信息采集系统。

3.1 案例一

3.1.1 案例基本信息

案例一由2个农网居民型台区组成,分别编号为台区1A和台区1B。台区在调整前可利用的有效历史数据为18天,分别编号为D1至D18。两个台区共计用户8户,每个台区各有4个用户。由于两个台区之间的户-变隶属关系存在错误,导致台区1A的线损率过高,而台区1B的线损率多呈现负值。调整前各台区日线损率如表2与表3所示。

表2 台区1A调整前日供电量及线损率

Table 2 The daily power supply and line loss rate of transformer area 1A before adjustment

日期	$W_{\text{DEL}}/\text{kWh}$	$\delta/\%$	日期	$W_{\text{DEL}}/\text{kWh}$	$\delta/\%$
D1	186.0	11.42	D10	200.4	9.04
D2	160.8	12.90	D11	201.6	11.40
D3	129.6	17.19	D12	176.4	12.67
D4	159.6	14.19	D13	133.2	16.41
D5	168.0	13.95	D14	102.0	16.29
D6	99.6	20.05	D15	98.4	18.66
D7	199.2	10.62	D16	183.6	9.67
D8	193.2	11.23	D17	180.0	10.77
D9	181.2	11.89	D18	159.6	9.13

表3 台区1B调整前供电量日供电量及线损率

Table 3 The daily power supply and line loss rate of transformer area 1B before adjustment

日期	$W_{\text{DEL}}/\text{kWh}$	$\delta/\%$	日期	$W_{\text{DEL}}/\text{kWh}$	$\delta/\%$
D1	26.4	-83.56	D10	39.6	-50.05
D2	26.4	-79.43	D11	26.4	-89.77
D3	36.0	-53.86	D12	31.2	-72.37
D4	54.0	-44.33	D13	38.4	-55.10
D5	28.8	-78.33	D14	25.2	-73.88
D6	46.8	-46.38	D15	21.6	-73.51
D7	45.6	-290.43	D16	32.4	-62.77
D8	32.4	-429.32	D17	25.2	-72.85
D9	26.4	-80.75	D18	33.6	-39.94

3.1.2 案例的结果分析

在对方案1进行求解时,将18个有效时长划分为两段,即第1段为D1至D9,第2段为D10至D18。对每一段分别进行求解,最终取两次优化结果的并集。案例一的求解结果如表4所示。其中,“调整情况”一列中,1表示保留,0表示调整到另一个台区中。

表4 案例一调整情况

Table 4 The adjustment of case 1

台区1A		台区1B	
用户序号	调整情况	用户序号	调整情况
1	1	1	0
2	1	2	1
3	1	3	1
4	1	4	0

从表4可以看出,台区1B的两个用户被调整到了台区1A。计算出所需要调整的用户与检修人员通过现场逐户核查得到结果保持一致。

3.2 案例二

3.2.1 案例基本信息

案例一由4个城网居民型台区组成,分别编号为台区2A至台区2D。台区在调整前可利用的有效历史数据为100天,分别编号为D1至D100。由于4个台区之间部分户-变隶属关系存在错误,因此每个台区的线损率都不在合格考核范围之内。由于案例二台区用户过多,受版面限制,此处使用台区日平均线损率对台区现状进行描述。4个台区的基本信息如表5所示。

表5 案例二调整前情况

Table 5 The situation of case 2 before adjustment

项目	内容			
台区编号	2A	2B	2C	2D
用户数/户	146	41	151	11
不合格天数/d	98	100	100	100
平均线损率/%	-20.81	10.20	-28.94	15.90

3.2.2 案例的结果分析

在对方案2进行求解时,将100个有效时长按

照每20天切割成一段,分别编号为L1至L5。模型求解过程中滚动优化的顺序如图4所示。其中共进行了4次求解,覆盖了全部时间,每次求解所利用的时段分别为I至IV。

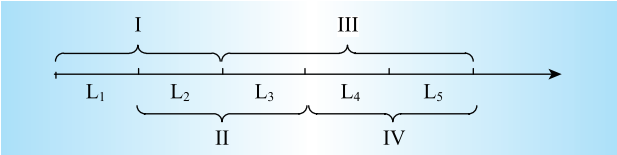


图4 案例二滚动优化示意图

Fig. 4 The rolling optimization schematic of case 2

对4次求解的结果取并集,得到的调整结果如表6所示。

表6 案例二调整情况

Table 6 The adjustment of case 2

	2A	2B	2C	2D
2A		5	0	2
2B	0		0	1
2C	1	3		2
2D	0	0	0	

表6展示了台区之间用户调整的状况。表中的每一个数值表示由对应行所在的台区向对应列所在的台区调整。例如,台区2A向台区2B调整的用户,以此类推。可以看出,4次优化共得到疑似户-变隶属关系错误的用户14户。

根据实际工程中检修人员逐户排查的结果,共核查出6户问题用户,且全部包含在上述14个疑似用户中。

4 结束语

低压台区的户-属关系错误是导致台区线损异常的主要原因之一。本文提出了一种基于数据驱动的台区户-变关系核查的方法,弥补了传统的检修人员需要对所有用户逐户排查方法的缺陷,提高了工作效率。该模型利用台区供、用电的历史数据,以台区日线损率最稳定为优化目标,建立了MIQP最优模型,并采用长时间尺度下滚动优化的方式,最终能够给出疑似发生户-变关系错误的用户。两个实际的案例分析表明,该模型能够达到预期目标,给出疑似档案错误的用户集合,实现台区户-变关系核查的高效化,有助于台区的精益化管理,是落实国家电网公司“三型两网、世界一流”战略目标的具体实践。D

参考文献:

[1] 张晓毅,贺惠民,李胜杰,等.三相不平衡造成的台区电

能损耗分析[J]. 电力需求侧管理,2017,19(2):36-38.
ZHANG Xiaoyi, HE Huimin, LI Shengjie, et al. Study on power loss caused by three phase imbalance [J]. Power Demand Side Management, 2017,19(2):36-38.
[2] 王拓,杨建萍,谈康.以市场为导向的电力营销管理探讨[J]. 电力需求侧管理,2018,20(2):54-56.
WANG Tuo, YANG Jianping, TAN Kang. Discussion of market oriented electric marketing management [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(2):54-56.
[3] 施文,李牧.台区线损异常成因分析及解决方法[J]. 电力需求侧管理,2010,12(4):59-61.
SHI Wen, LI Mu. Causes analysis of line loss for transformer areas and its solutions [J]. Power Demand Side Management, 2010, 12(4):59-61.
[4] 刘畅.基于用电信息采集系统的低压配电台区线损原因分析及治理[J]. 河北电力技术,2016,35(2):45-47.
LIU Chang. Cause analysis and settlement on line loss of low voltage distribution area based on electricity information acquisition system [J]. Hebei Electric Power, 2016, 35(2):45-47.
[5] 王海云,张岩,闫富荣,等.基于深度神经网络的低压台区线损异常识别方法[J]. 电力需求侧管理,2018,20(6):31-35.
WANG Haiyun, ZHANG Yan, YAN Furong, et al. The study of coal to electricity district line loss anomaly identification method based on deep neural network [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(6):31-35.
[6] 邢毓卿,陶特伦,蔡奇宏,等.台区线损智能化管控模块的开发及应用[J]. 电力需求侧管理,2018,20(4):56-59.
XING Yuqing, TAO Telun, CAI Qihong, et al. Development and application of intelligent control module for line loss in transformer area [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(4):56-59.
[7] 丁涛,郭庆来,柏瑞,等.松弛MPEC和MIQP的启发-校正两阶段动态无功优化算法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(13):2100-2107.
DING Tao, GUO Qinglai, BO Rui, et al. Two-stage heuristic - correction for dynamic reactive power optimization based on relaxation-MPEC and MIQP [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13):2100-2107.
[8] YELCHURU R, SKOGESTAD S, MANUM H. MIQP formulation for controlled variable selection in self optimizing control [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(5):61-66.
[9] 张聚,李平,王万良.基于Branch & Bound方法MIQP问题的求解及应用[J]. 系统仿真学报,2003,15(4):488-491.
ZHANG Ju, LI Ping, WANG Wanliang. Branch & Bound based solution of MIQP problem and its application [J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(4):488-491.

作者简介:

李平(1985),男,江苏扬州人,硕士,工程师,主要从事通信与信息、软件设计与开发工作;
吴伟将(1990),男,湖北武汉人,博士,工程师,主要从事线损管理工作;
严永辉(1978),男,广东丰顺人,工程师,主要从事计算机应用技术、用电信息采集工作;
王瑾然(1994),男,河北廊坊人,硕士研究生,主要从事用电信息采集相关工作。

(责任编辑 陈 可)