

非侵入式电力负荷在线分解

黎 鹏, 余贻鑫

(天津大学电力系统仿真控制教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 基于用电设备正常工作时的稳态电流(包含基波和谐波)具有一定统计规律性,提出了一种非侵入式电力负荷在线分解方法. 当某一电力负荷内部含有 n 类主要用电设备时,其电流可近似用这 n 类用电设备电流的线性叠加来估计. 负荷分解是应用最优方法求取一组合理的权重系数,使负荷估计电流与负荷真实电流最为接近,从而确定电力负荷中不同类型用电设备的功率消耗比例. 实验结果表明,所提出的负荷分解方法不仅具有较高的精度和较好的稳定性,而且便于在线实现.

关键词: 负荷分解; 非侵入式; 单元电流; 微分进化; 谐波分析; 负荷监测

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 0493-2137(2009)04-0303-06

Nonintrusive Method for On-Line Power Load Decomposition

LI Peng, YU Yi-xin

(Key Laboratory of Power System Simulation and Control of Ministry of Education,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A novel nonintrusive method for on-line power load decomposition was proposed based on the fact that in normal operation states of electrical appliances, steady-state currents (including fundamental and harmonic currents) of electrical appliances have certain statistical regularity. A power load current can be approximately estimated by the linear superposition of the currents components of n main types of electrical appliances when the power load consists of n main types of electrical appliances. The subject of the power load decomposition is to calculate a group of reasonable weight coefficients by an optimization method, so that the estimation current has the maximum similarity with the real current, and therefore the power consumption ratio of different types of electrical appliances can be confirmed. The experimental results indicate that the load decomposition method not only has higher precision and better stability, but also is easy to be realized on-line.

Keywords: load decomposition; nonintrusive; unit current; differential evolution; harmonic analysis; load monitoring

电力负荷不同类型用电设备的功率消耗比例在线分解(简称电力负荷分解)数据有助于电力公司了解电力用户负荷的组成,合理安排负荷使用时间(“削峰填谷”),提高电网的利用率和减少电力系统投资. 负荷分解数据还可以改善电力负荷预测精度,为电力系统规划提供更准确的依据. 电力用户也可以通过数据分析减少自身不必要的能源开销,从而达到节能降耗的目的. 此外,将负荷分解数据向上聚合^[1-2]到输电系统,有助于建立更为精准的负荷模型,从而提高仿真计算和稳定分析的准确性. 因此,电力

负荷分解数据对全社会节能和电力系统规划及运行都有十分重要的意义.

负荷分解研究分为侵入式和非侵入式两大类^[3]. 侵入式方法得到的数据比较准确,但耗费巨大,不适于推广和在线应用. 非侵入式方法主要是基于电力负荷入口处的电压、电流及功率的变化信息进行跟踪分解. 这一方法始于20世纪80年代^[4],由于受当时测量水平的限制,最初还只是基于稳态功率变化信息,方法具有一定的局限性. 随着软、硬件水平的提高和测量手段的发展,文献[5]提出了基于用电设

收稿日期: 2008-04-07; 修回日期: 2008-10-13.

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50595413); 天津市自然科学基金资助项目(09JCZDJC2500); “十一五”国家科技支撑计划重大资助项目(2006BAJ03A06).

作者简介: 黎 鹏 (1978—), 男, 博士研究生, elitunco@126.com.

通讯作者: 余贻鑫, yixinyu@tju.edu.cn.

备暂态投切信息谱分析的负荷跟踪分解方法;文献[6]给出了基于多处理器的电力负荷暂态事件检测系统的软、硬件实现方案;文献[7]具体描述了美国电科院(US EPRI)资助项目“非侵入式负荷监测系统(nonintrusive appliance load monitoring system, NIALMS)”,该系统通过捕捉单个用电设备的投切信息实现对整个建筑的负荷跟踪分解.文献[8]提出一种基于用电设备投切对电压的扰动信息进行负荷跟踪分解的方法.非侵入式方法与侵入式方法相比投入较低,适于在线应用,但需要负荷监测装置不间断地捕捉电力负荷每一个变化信息,对软、硬件的要求比较高.

1 分解方法

当供电电压符合国标^[9]规定时,用电设备正常工作的稳态电流(包含基波和谐波)具有一定的统计规律,电流可以表示为

$$i_a(t) = I_{a1} \cos(\omega t + \theta_{a1}) + \dots + I_{ak} \cos(k\omega t + \theta_{ak}) + \dots \quad (1)$$

$$I_{ak} = \alpha_{ak} I_{a1}$$

式中: $i_a(t)$ 为某一用电设备稳态工作电流的瞬时值; I_{a1} 是工作电流中基波分量的幅值; ω 为工作电流中基波分量的角频率; θ_{a1} 为工作电流中基波分量的初相角; k 为正整数,当 $k=1$ 时,表示基波; I_{ak} 为工作电流中第 k 次谐波分量的幅值; $k\omega$ 为工作电流中第 k 次谐波分量的角频率; θ_{ak} 为工作电流中第 k 次谐波分量的初相角; α_{ak} 为表示 I_{ak} 和 I_{a1} 比例关系的小于 1 的非负实数.

为了清晰地表明各种电流分量间的相对比例,本文采用标么值,即所有电流分量采用同一个电流基值.故式(1)和后续表达式均应看作是具有同一基值的标么值表达式.

式(1)等号两边同时除以 I_{a1} ,可得电流表达式为

$$i'_a(t) = 1 \cdot \cos(\omega t + \theta_{a1}) + \dots + \alpha_{ak} \cdot \cos(k\omega t + \theta_{ak}) + \dots \quad (2)$$

将 $i'_a(t)$ 定义为该类用电设备的单元电流,即其电流基波幅值的标么值为 1 时的电流.

同理,电力负荷的单元电流定义为

$$i'_L(t) = 1 \cdot \cos(\omega t + \theta_{L1}) + \dots + \alpha_{Lk} \cos(k\omega t + \theta_{Lk}) + \dots \quad (3)$$

式中:下标 L 表示电力负荷; α_{Lk} 为电力负荷单元电流第 k 次谐波分量幅值与基波分量幅值的比例系数; θ_{Lk} 为电力负荷单元电流第 k 次谐波分量的初

相角.将 $i'_L(t)$ 定义为电力负荷的单元电流,即电力负荷电流基波幅值的标么值为 1 时的电流.

当这一电力负荷里面含有 n 类主要用电设备时(负荷内部也许还包括其他类型用电设备,但在负荷电流中的比例非常小,可以忽略不计),其电流可用这 n 类用电设备电流的线性叠加来近似估计,即

$$i'_L(t) = \beta_1 i'_{a1}(t) + \beta_2 i'_{a2}(t) + \dots + \beta_n i'_{an}(t) \quad (4)$$

式中: $i'_{a1}(t)$, $i'_{a2}(t)$, \dots , $i'_{an}(t)$ 分别为第 1, 2, \dots , n 类用电设备的单元电流; β_1 , β_2 , \dots , $\beta_n \in [0, +\infty)$ 分别为第 1, 2, \dots , n 类用电设备的电流权重系数.

用相量法描述,式(4)可表示为

$$\begin{bmatrix} 1 \angle \theta_{L1} \\ \vdots \\ \alpha_{Lk} \angle \theta_{Lk} \\ \vdots \\ \alpha_{Lm} \angle \theta_{Lm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \angle \theta_{1,a1} & 1 \angle \theta_{1,a2} & \dots & 1 \angle \theta_{1,an} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{k,a1} \angle \theta_{k,a1} & \alpha_{k,a2} \angle \theta_{k,a2} & \dots & \alpha_{k,an} \angle \theta_{k,an} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{m,a1} \angle \theta_{m,a1} & \alpha_{m,a2} \angle \theta_{m,a2} & \dots & \alpha_{m,an} \angle \theta_{m,an} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: m 为方程组所计及的最大谐波次数; n 为负荷内部主要用电设备类型数; α_{k,a_j} 为该负荷的第 j 类用电设备第 k 次谐波分量幅值与基波分量幅值的比例系数; θ_{k,a_j} 为第 j 类用电设备第 k 次谐波分量的初相角, $\forall j \in \{1, 2, \dots, n\}$, 是通过离线测量统计得到的已知量; β_1 , β_2 , \dots , $\beta_n \in [0, +\infty)$ 是方程组的待求变量; α_{Lk} 和 θ_{Lk} 都是通过在线实测得到的已知量, $\forall k \in \{1, 2, \dots, m\}$;

本文中称式(5)为估计方程,可简记为

$$I_L = H_a \beta \quad (6)$$

式中: I_L 为负荷端口电流列向量; H_a 为用电设备电流参数矩阵; β 为电流权重系数列向量.

由于式(5)是一个带约束的不相容方程组,因此选用最优算法对式(5)进行求解,目标函数为

$$\min_{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n \in [0, +\infty)} \|I_L - H_a \beta\|^2 \quad (7)$$

式中 $\|\bullet\|$ 表示 L_2 范数.

负荷分解就是要找到一组合理的 β_1 , β_2 , \dots , β_n , 使得式(7)有最小值.通过最优求解,可以得到电力负荷中各类主要用电设备的电流含量,即将电力负荷按其用电设备类进行分解.

2 用电设备电流参数矩阵元素的确定

本文将用电设备分为常阻抗与非常阻抗两大类. 对于常阻抗类用电设备, 如电阻、电容和电感等, 其稳态电流所对应的元素 $\alpha_{k,aj}$ 和 $\theta_{k,aj}$ 可根据负荷端口实测电压直接确定. 对于非常阻抗类(如空调、计算机等), 采用模糊 C 均值聚类的方法将其供电电压划分成若干个类, 在进行电力负荷分解计算时, 选取与当前供电电压所在类相对应的 $\alpha_{k,aj}$ 和 $\theta_{k,aj}$ 作为用电设备参数矩阵的元素.

2.1 常阻抗类

负荷端口的供电电压可以表示为

$$v(t) = V_1[1 \cdot \cos(\omega t + 0^\circ) + \dots + \alpha_k \cos(k\omega t + \theta_k) + \dots] \quad (8)$$

式中: $v(t)$ 为供电电压的瞬时值; V_1 为供电电压中基波分量的幅值; ω 是基波分量的角频率; 基波电压初相角为 0° (本文中以基波电压为参考相量); $k\omega$ 表示供电电压中第 k 次谐波分量的角频率; θ_k 表示供电电压中第 k 次谐波分量的初相角; $\alpha_k = V_k/V_1$, V_k 为供电电压中第 k 次谐波分量的幅值, $\alpha_1 = 1$, 当 $k > 1$ 时, α_k 为远小于 1 的非负实数.

当 $v(t)$ 分别作用在电阻 R 、电容 C 和电感 L 上时, 其稳态工作电流可分别表示为

$$\begin{cases} i_R(t) = I_{R_1}[1 \cdot \cos(\omega t + 0^\circ) + \dots + \alpha_k \cos(k\omega t + \theta_k) + \dots] \\ i_C(t) = I_{C_1}[1 \cdot \cos(\omega t + 90^\circ) + \dots + k\alpha_k \cos(k\omega t + \theta_k + 90^\circ) + \dots] \\ i_L(t) = I_{L_1}[1 \cdot \cos(\omega t - 90^\circ) + \dots + \frac{1}{k}\alpha_k \cos(k\omega t + \theta_k - 90^\circ) + \dots] \end{cases} \quad (9)$$

式中: $I_{R_1} = V_1/R$, $I_{C_1} = V_1\omega C$, $I_{L_1} = V_1/\omega L$; $i_R(t)$ 、 $i_C(t)$ 和 $i_L(t)$ 分别为电阻、电容和电感负荷稳态工作电流瞬时值. 其单元电流 $i'_R(t)$ 、 $i'_C(t)$ 和 $i'_L(t)$ 的表达式分别为

$$\begin{cases} i'_R(t) = 1 \cdot \cos(\omega t + 0^\circ) + \dots + \alpha_k \cos(k\omega t + \theta_k) + \dots \\ i'_C(t) = 1 \cdot \cos(\omega t + 90^\circ) + \dots + k\alpha_k \cos(k\omega t + \theta_k + 90^\circ) + \dots \\ i'_L(t) = 1 \cdot \cos(\omega t - 90^\circ) + \dots + \frac{1}{k}\alpha_k \cos(k\omega t + \theta_k - 90^\circ) + \dots \end{cases} \quad (10)$$

即对于常阻抗类用电设备电流参数矩阵 H_a 相应的元素可根据负荷端口实测电压直接确定.

2.2 非常阻抗类

对于非常阻抗类用电设备, 先对其进行大量实测采样(电压、电流), 然后用模糊 C 均值聚类^[10]的方法将供电电压划分成若干个类, 得到各类相应的电压/电流采样数据的中心. 即对于某类用电设备, 其每一个电压类都有一个形如式(2)的单元电流与之对应, 从而确定电流参数矩阵 H_a 相应列的元素. 也就是说, 对于每一类用电设备, 其当前供电电压属于不同的电压类时, H_a 中相应列的参数也是有所区别的. 这种参数选取的方法可有效地提高负荷分解的精度. 下面以空调为例进行具体说明.

空调正常工作时的电压、电流数据如图 1 所示; 对空调的电压数进行模糊 C 均值聚类, 得到各类的聚类中心如图 2 所示. 相应的电流中心如图 3 所示.

通过对用电设备正常工作时电压和电流数据进行聚类划分, 可以得到其电压-电流对应参数, 用于式(5)中用电设备电流参数矩阵 H_a 相应元素的选取, 有效提高负荷分解的精度.

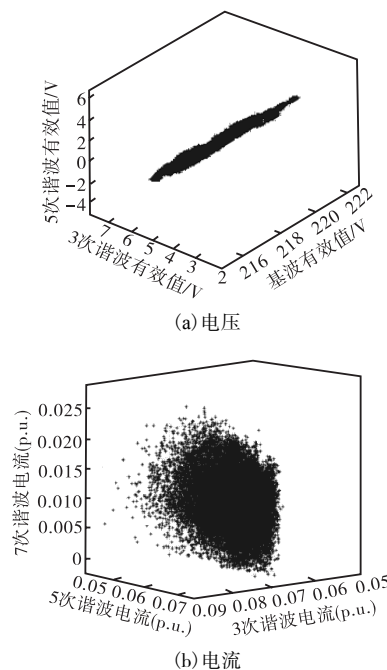


图 1 空调电压和电流数据

Fig.1 Voltage and current data of air conditioner

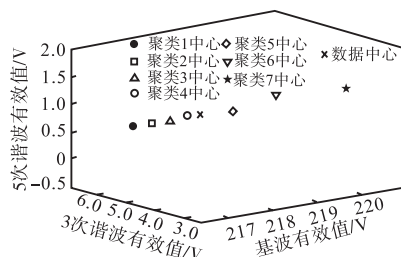


图 2 电压聚类

Fig.2 Clustering of voltage data

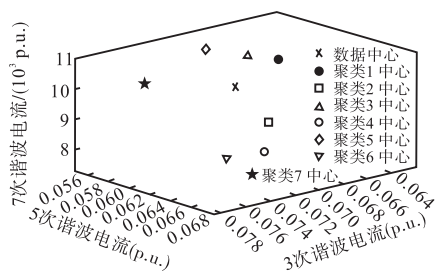


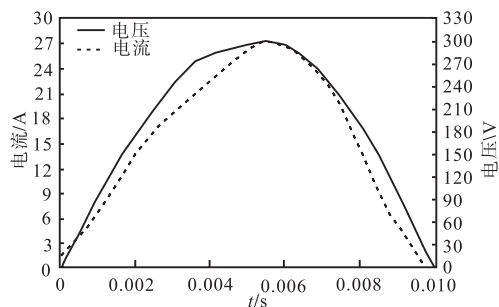
图 3 电流数据中心

Fig.3 Centers of current data

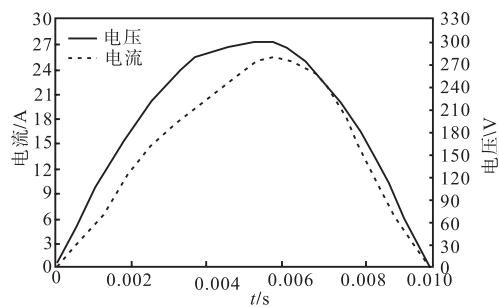
3 实测分解对比

3.1 相同用电设备运行情况

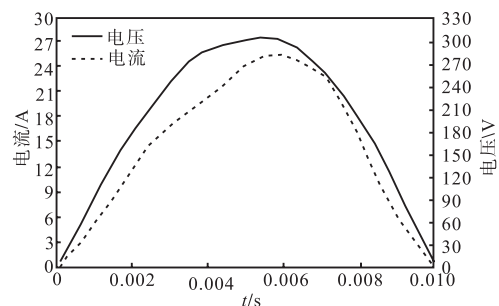
夏季,在天津某国家级高新技术产业园区一软件公司内实测得到的 3 组不同供电电压作用下相同用电设备运行时的电压和电流波形如图 4 所示.



(a) 供电电压 1



(b) 供电电压 2



(c) 供电电压 3

图 4 电压和电流波形

Fig.4 Waveforms of voltage and current

由实测电压可确定式(5)中用电设备电流参数矩

阵的相应元素 $\alpha_{k,aj}$ 和 $\theta_{k,aj}$, $\forall k \in \{1,2,\dots,m\}$, $\forall j \in \{1,2,\dots,n\}$;由在线实测电流可以确定式(5)中的 α_{Lk} 和 θ_{Lk} . 应用微分进化算法^[11]对上面 3 种情况进行分解,结果分别如表 1~表 3 所示.

表 1 供电电压 1 分解结果

Tab.1 Decomposition results of power voltage 1

类 别	真实用电比例		微分进化法分解结果		分解偏差	
	P	Q	P	Q	P	Q
电阻类	18.4	0	16.4	0	-2.0	0
空调类	62.9	87.0	63.5	182.7	0.6	-4.3
计算机	8.1	55.8	9.2	61.3	1.1	5.5
日光灯	10.6	-342.8	10.9	-344.0	0.3	-1.2

注: ①计算用时 0.114 s; ②全部计算都是在 CPU 为 Pentium 1.8 GHz 的 PC 机上完成的; ③无功为正代表吸收,为负代表发出.

表 2 供电电压 2 分解结果

Tab.2 Decomposition results of power voltage 2

类 别	真实用电比例		微分进化法分解结果		分解偏差	
	P	Q	P	Q	P	Q
电阻类	19.1	0	18.9	0	-0.2	0
空调类	62.0	229.6	61.2	220.0	-0.8	-9.6
计算机	8.1	24.6	9.8	26.5	1.7	1.9
日光灯	10.8	-154.2	10.1	-146.5	0.7	7.7

注: 计算用时 0.121 s

表 3 供电电压 3 分解结果

Tab.3 Decomposition results of power voltage 3

类 别	真实用电比例		微分进化法分解结果		分解偏差	
	P	Q	P	Q	P	Q
电阻类	21.1	0	20.6	0	-0.5	0
空调类	60.0	907.7	57.9	901.3	-2.1	-6.4
计算机	7.7	137.2	8.5	139.5	0.8	2.3
日光灯	11.2	-944.9	13.0	-940.8	1.8	4.1

注: 计算用时 0.116 s

从表 1~表 3 可以看出,在不同供电电压作用下,即使是运行相同的用电设备,其负荷内部的功率消耗比例也会有一些差别;由于基波功率因数接近于 1,无功功率很小,所以无功比例的波动比较大.

3.2 不同用电设备运行情况

夏季,某居民负荷下实测 3 组不同用电设备运行时的电压和电流波形,如图 5 所示.

这 3 组数据的分解结果分别列于表 4~表 6.

3.3 不同优化算法的对比

具有解空间约束的各种优化算法均可用于电力负荷分解计算,但从计算速度上看最小二乘法最快;

而从计算速度和准确性两个角度综合考虑,非负最小二乘法^[12]和微分进化法较好,故本文中重点展示用最小二乘法、非负最小二乘法和微分进化法求解的结果. 选取应用微分进化法计算得到的有功功率偏差最大算例,即不同比例居民负荷的第 1 组算例(见表 4)作为 3 种算法的比较算例. 表 7 和表 8 分别给出了最小二乘法和非负最小二乘法的分解结果.

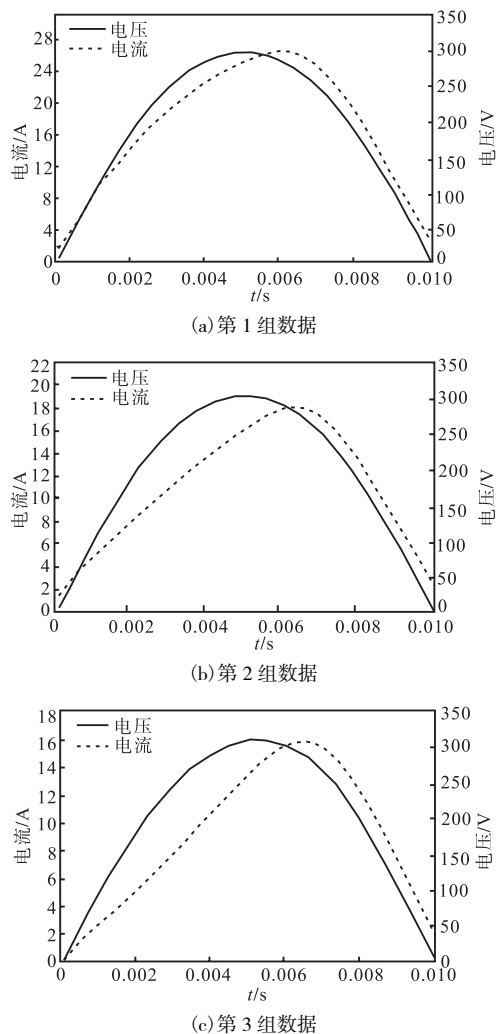


图 5 不同比例居民负荷电压和电流波形

Fig.5 Voltage and current waveforms of residential load in the different proportions

表 4 第 1 组数据分解结果

Tab.4 Decomposition results of the first group data

类 别	真实用电比例		微分进化法分解结果		分解偏差	
	P	Q	P	Q	P	Q
电阻类	57.3	0	61.8	0	4.5	0
空调类	39.8	98.8	35.0	98.5	-4.8	-0.3
电视机	2.9	1.2	3.2	1.5	0.3	0.3
计算机	0	0	0	0	0	0
日光灯	0	0	0	0	0	0

注: 计算用时 0.111 s

表 5 第 2 组数据分解结果

Tab.5 Decomposition results of the second group data

类 别	真实用电比例		微分进化法分解结果		分解偏差	
	P	Q	P	Q	P	Q
电阻类	35.0	0	37.8	0	2.8	0
空调类	60.6	98.7	57.0	98.5	-3.6	-0.2
电视机	4.4	1.3	5.2	1.5	0.8	0.2
计算机	0	0	0	0	0	0
日光灯	0	0	0	0	0	0

注: 计算用时 0.113 s

表 6 第 3 组数据分解结果

Tab.6 Decomposition results of the third group data

类 别	真实用电比例		微分进化法分解结果		分解偏差	
	P	Q	P	Q	P	Q
电阻类	21.2	0	24.3	0	3.1	0
空调类	73.4	98.8	70.7	99.3	-2.7	0.5
电视机	5.4	1.2	5	0.7	-0.4	-0.5
计算机	0	0	0	0	0	0
日光灯	0	0	0	0	0	0

注: 计算用时 0.117 s

表 7 最小二乘法分解结果

Tab.7 Decomposition results of the least square method

类 别	真实用电比例		最小二乘法分解结果		分解偏差	
	P	Q	P	Q	P	Q
电阻类	57.3	0	71.7	0	14.4	0
空调类	39.8	98.8	28.8	81.6	-11.0	-17.2
电视机	2.9	1.2	1.9	0.9	-1.0	-0.3
计算机	0	0	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2
日光灯	0	0	-2.3	17.7	-2.3	17.7

注: 计算用时 0.011 s

表 8 非负最小二乘法分解结果

Tab.8 Decomposition results of the non-negative least square method

类 别	真实用电比例		非负最小二乘法分解结果		分解偏差	
	P	Q	P	Q	P	Q
电阻类	57.3	0	62.7	0	5.4	0
空调类	39.8	98.8	34.5	98.6	-5.3	-0.2
电视机	2.9	1.2	2.8	1.4	-0.1	0.2
计算机	0	0	0	0	0	0
日光灯	0	0	0	0	0	0

从表 7 和表 8 可以看出:①本文中提出的负荷分解方法无论是在不同电压作用相同用电设备运行的情况下,还是在不同用电设备运行的情况下都具有较高的精度和较好的数值稳定性;②最小二乘法计算结果偏差很大(没有解空间的约束),不能用于电力负

荷分解计算;微分进化算法的计算精度略好于非负最小二乘法,相比之下更适于负荷分解计算.

4 结 语

提出了一种新颖的非侵入式电力负荷在线分解方法,该方法是基于用电设备正常工作时的稳态电流(包含基波和谐波)具有一定统计规律性这一事实的,其核心部分是一个应用相量法描述的带约束的不相容线性代数方程组形式的估计方程和相应的目标函数.对实测数据进行分解计算的结果表明,这种方法可有效地在线确定电力负荷中不同类型用电设备的功率消耗比例.具有解空间约束的各种优化算法均可用于问题的求解,本文中推荐使用微分进化算法.目前,我国正在大力推广电力负荷管理装置,且它们大多具有谐波分析能力,所以本文中提出的非侵入式负荷分解方法的应用具备较好的硬件条件,只需要对软件稍加改进便可实现负荷分解功能.

参考文献:

- [1] 郭金川,余贻鑫,黎 鹏,等. 计及负载率和临界滑差的改进感应电动机加权聚合[J]. 电力系统自动化,2008,32(14):6-9.
Guo Jinchuan, Yu Yixin, Li Peng, et al. An improved weighting-mean aggregation method of induction motors considering load rates and critical slips [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(14): 6-9 (in Chinese).
- [2] Price W W, Wirgau K A, Murdoch A, et al. Load modeling for power flow and transient stability computer studies[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1988, 3(1): 180-187.
- [3] Hart G W. Nonintrusive appliance load monitoring[J]. *Proceedings of IEEE*, 1992, 80(12): 1870-1891.
- [4] Hart G W. Residential energy monitoring and computerized surveillance via utility power flows[J]. *IEEE Technology and Society Magazine*, 1989, 8(2): 12-16.
- [5] Leeb S B, Shaw S R, Kirtley J L. Transient event detection in spectral envelope estimates for nonintrusive load monitoring[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995, 10(3): 1200-1210.
- [6] Khan U A, Leeb S B, Lee M C. A multiprocessor for transient event detection[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1997, 12(1): 51-60.
- [7] Drenker S, Kader A. Nonintrusive monitoring of electric loads[J]. *IEEE Computer Applications in Power*, 1999, 12(4): 47-51.
- [8] Cox R, Leeb S B, Shaw S R, et al. Transient event detection for nonintrusive load monitoring and demand side management using voltage distortion[C]//*IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. Dallas, 2006: 1751-1757.
- [9] 国家电力公司发电运运营部. 电力工业技术监督标准汇编(电能质量监督)[M]. 北京:中国电力出版社, 2003.
State Grid Generate and Transmit Electricity Business Department. *Electric Technical Intendence Criterion Compilation of Power Industry(the Power Quality Intendence)*[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003 (in Chinese).
- [10] 高新波. 模糊聚类分析及其应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004.
Gao Xinbo. *Fuzzy Cluster Analysis and Its Applications*[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004 (in Chinese).
- [11] Storn R, Price K. Differential evolution: A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. *Journal of Global Optimization*, 1997, 11(4): 341-359.
- [12] Lawson C L, Hanson R J. *Solving Least-Squares Problems*[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1974.