

[控制系统]

基于均线及小波分析理论的电气化铁路负荷建模研究

文/国网冀北电力有限公司张家口供电公司 谢旭 武星辰
北京清软创新科技股份有限公司 邵常宁 刘梅

随着电气化铁路的高速发展，大量高频波动负荷的接入给电网的安全稳定运行带来了不可忽视的冲击。通过探究电气化铁路负荷的产生机理和分布特性，提出了一种基于均线理论和小波分析重构的电气化铁路负荷预测办法，并以实际的算例进行了模拟验证，显示了对冲击性强的低频负荷较好的推演预测能力。

铁路干线作为国民经济发展输送养料的“大动脉”，自改革开放以来为我国30多年的高速增长做出了巨大的贡献。20世纪90年代以来，我国电气化铁路发展迅猛，尤其是近年来我国高速铁路的发展取得了举世瞩目的成就，俨然已经成为中国制造的“金名片”。目前我国最繁忙的5大干线及其支线已实现全线电气化，总里程已达5万km以上，居世界第一。但是电气化铁路的大量普及也带来一系列问题，关键的一个问题就是电力系统对于铁路供电这种特殊负荷的承载能力。

在电气化铁路发展的初期，少量的电气化铁路负荷与体量庞大的电力系统负荷相比非常微小，完全可以看作扰动的形式被系统消纳。而以如今的电气化铁路负荷的规模，大量高频随机性负荷的接入会对电网的经济稳定运行带来冲击，而电气化铁路负荷特有的高次谐波和负序电流更是会对电力系统产生直接危害。因此除了从电气化铁路自身牵引站和接触网的设计中进行相关治理之外，更应从数学的角度对电气化铁路负荷进行规律研究与预测建模，制订考虑电气化铁路因素的准确的日前调度计划。

电气化铁路负荷的建模研究的核心问题集中在高频分量的处理上。大部分文献对电气化铁路的研究集中于单个牵引站负荷的建模研究，鲜有以电气化铁路行业负荷作为对象研究的。本文以

电气化铁路行业负荷为主要研究对象，使用均线理论对牵引负荷进行趋势分离，对分离出的剩余分量进行小波分析，再对小波分析的各个频段的结果进行建模预测，最后合成趋势预测结果，并以电气化铁路网络较为发达的某地区作为算例进行了验证。

牵引负荷产生机理及负荷特性

电气化铁路牵引供电系统由电力机车、牵引网和牵引变电站组成，其结构如图1所示。电能由高压公共电网接入牵引变电站，经过牵引变压器的降压、分相，由牵引网（接触网）对电力机车进行供电。

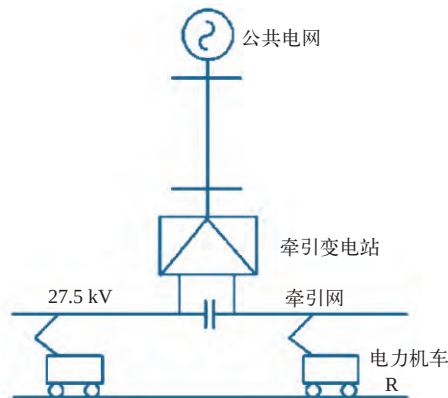


图1 电气化铁路牵引系统结构示意图

目前我国大部分高速铁路的牵引系统采用V/V接线，牵引变压器一次额定电压220 kV，二次额

定电压27.5 kV，直接与牵引网相连。牵引网以自耦变压器（Auto Transformer, AT）的方式向电力机车供电。电力机车上装有PWM逆变器将牵引网上的单相交流电变换为一定频率和幅值的三相交流电，驱动电力机车的三相异步电机转动。

由以上牵引系统分析可知牵引负荷的产生机理及负荷结构特点。当牵引区域内没有机车经过时，有功及无功牵引负荷均为0；当牵引区域内有机车进入时有功负荷会立即产生，无功补偿设备迅速启动以产生无功负荷，形成正向的阶跃分量；当机车驶出牵引区域有功负荷会迅速消失，同时无功补偿装置也应立即切除，形成负向的阶跃分量。机车在牵引区域内的负荷情况与机车的行驶状况有关，加速阶段吸收功率，牵引负荷增加；制动时向牵引网送出功率，牵引负荷变为负值。加速和制动是在一个较长的时间段完成，因此负荷的变化较为缓慢，称为低频缓坡型分量；最后一种高频波动分量则是机车在行驶过程中运动状态的微小变化及扰动产生的，变化频率高幅度小。典型的牵引负荷如图2所示。

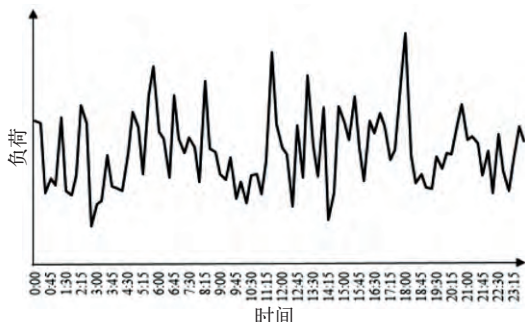


图2 典型牵引负荷曲线

受天气环境、道路状况及政策活动等因素的频繁影响，机车进出各个牵引站的时间、用电状况等也会产生频繁的变化，使得单个牵引站负荷情况很难跟踪。但对于电网系统来讲，整体的电气化铁路行业负荷即多个牵引站负荷的叠加此消彼长，会呈现一定的稳定性。以高铁网络较为发达的某地市为例，经统计，该地区所有牵引站叠加得到的电气化铁路行业负荷如图3所示。

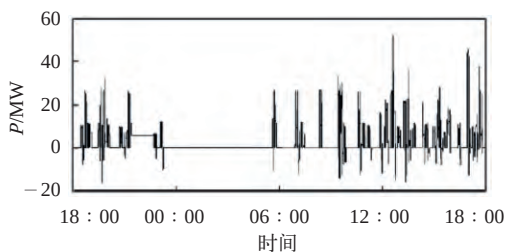


图3 电气化铁路行业负荷

由图2可见，典型电气化铁路行业负荷由一系列尖峰脉冲的无序排列而成。整体负荷趋势较为平缓，呈现出早低晚高的特征。统该地区电气化铁路行业负荷一段时间内的负荷特征指标如表1所示。

表1 电气化铁路行业负荷特征值

	电气化铁路负荷	系统负荷
最大负荷/MW	90.19	2024.48
最小负荷/MW	12.00	1530.49
平均负荷/MW	42.11	1797.08
峰谷差/MW	65.71	401.08
峰谷差率	0.82	0.20
负荷率	0.53	0.90

由图3可知，该地区电气化铁路行业平均负荷42.11 MW，占地区平均负荷的2.34%；最大负荷约为80.31 MW，占地区总最大负荷的4.5%，远高于平均负荷比例；最小负荷约为12 MW，占地区最小负荷的0.8%，远低于平均负荷比例；峰谷差率为0.82，远远高出地区负荷的0.2。这充分体现了电气化铁路负荷波动程度远高于系统负荷，最高5%左右的比例已足以对系统造成冲击。

尽管波动剧烈，但各日的负荷特征值均分布在均值附近，表现出电气化铁路负荷仍然是有一定的规律性的。除上述常规负荷特征值以外，电气化铁路负荷还有一个特殊的特征值，即每日的尖峰个数，代表着各日内电力机车在所有牵引站内的运行情况。研究发现在表1统计的时段内每天负荷尖峰数均在24~27之间，每个尖峰时间排列顺序又有整体相似性。这个特性决定了电气化铁路负荷的阶跃分量可以用小波分解的方式进行拟合。

理论准备

1. 均线理论

均线即移动平均线，借鉴自股票市场研究理论，其理论基础即趋势的相似性使得分离出的规律性较强的平缓分量，可以通过外推进行预测。

均线分析是股市中的重要技术分析理论。借计算每5个交易日股价的平均值并不断移动计算，将得到的平均股价用平滑的曲线连接起来即5日均线，以此类推有10日均线、20日均线及60日均线等。短期均线与中长期均线的不同排列形态来确定股价的短期走势与中长期走势相对强弱，从而指导人们进行股票投资决策。

而对于电气化铁路负荷来讲，一个较大地区铁路系统每天执行的调度安排是统一的，发车的班次、时间等是相对固定的，因此尽管电气化铁路负荷的波动剧烈，但总体发展趋势是有规律可

循的,可以通过类似股票分析中的均线理论将能代表电气化铁路负荷发展的趋势性分量分离出来。本文中我们所研究的电气化铁路负荷在其波动性和趋势性上有类似的地方,所以可以借助股市中的均线理论对电气化铁路负荷进行分析建模研究。

2. 小波分析

小波分析是近年来逐渐兴起的重要信号分析方法,吸收了现代数值分析、样条分析和傅里叶分析等诸多思想,在信号处理、模式识别等领域中具有广泛的应用。相比其他传统信号分析方式,小波分析最大的优点在于时频的局部变化分析通过伸缩平移运算对信号逐步进行多尺度细化,达到高频处时间细分,低频处频率细分的变换效果,自动适应时频信号分析的要求,解决了傅里叶变换的困难问题,被誉为“数学显微镜”。

小波分析的主要思想是选择合适的小波基函数 $\psi(t)$,然后对小波基函数通过如下方式生成函数族 $\{\psi_{b,a}(t)\}$,即

$$\psi_{b,a}(t) = a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

然后通过函数族 $\{\psi_{b,a}(t)\}$ 对信号进行分析。和傅里叶分析一样,小波分析也有很多种,如连续小波变换、离散小波变换以及快速离散小波变换,快速小波变换也叫作小波多分辨率分析等。对于一个能量有限函数 $f(t)$,其连续小波变换定义为

$$W_f(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

相应的连续小波变换的逆变换方程为

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{\mathbb{R}^+} \int_{\mathbb{R}} W_f(a,b) \overline{\psi_{a,b}}(t) \frac{da db}{a^2} \quad (3)$$

其中, C_ψ 满足式

$$\int_{\mathbb{R}^+} \int_{\mathbb{R}} W_f(a,b) \overline{W_f(a,b)} \frac{da db}{a^2} = C_\psi \langle f, f \rangle \quad (4)$$

式(4)中, b 代表时间上的位移;而 a 则代表时间尺度; $W_f(a,b)$ 是指原信号 $f(t)$ 在时间 b 处所包含的尺度为 a 的小波函数分量,表示了信号 $f(t)$ 和小波函数 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 之间相关联的程度。

连续小波变化的实现过程。首先选择一个小波基函数,固定一个尺度因子,将它与信号的初始段进行比较;通过式(2)的计算公式计算小波系数(反映了当前尺度下的小波与所对应信号段的相似程度);改变平移因子,是小波沿时间轴位移,重复上述两个步骤完成一次分析;最后增加尺度因子,重复上述三个步骤进行第二次分析。循环执行上述四个步骤,直到满足分析要求为止。

本文将结合小波分析手段对进行趋势分量分离后的剩余分量进小波变换,对不同的频率的分量进行平滑预测,得到剩余分量的建模预测结果。

建模研究

基于均线及小波分析理论的电气化铁路负荷建模整体思路如图4所示。

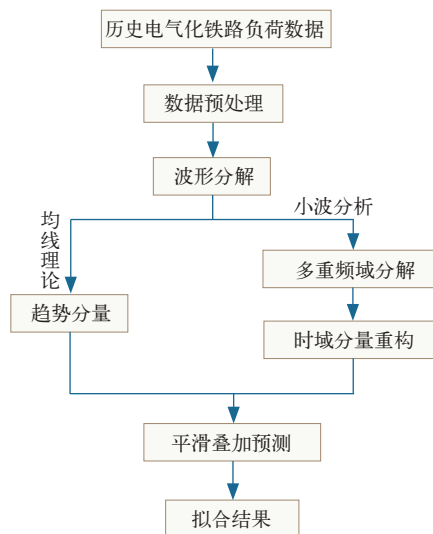


图4 电气化铁路负荷建模整体思路

首先需要获取到完整的历史电气化铁路负荷数据,对其进行预测处理以提高数据的质量和可研究性。其次进行波形分解,按照上文论述的均线理论和小波分析理论将原始负荷波形分解为平缓的趋势分量和剩余分量。趋势分量直接平滑预测即可,剩余分量经小波变换到多重频域分量,再将各层频域分量重构至时域,对每层时域分量根据其特点分类预测,最后将所有的预测结果叠加得到拟合结果。下面将以前面提到的某市的电气化铁路负荷为例进行详细的建模说明。

1. 趋势分离

设负荷的采样点数为 T ,第 i 天的负荷曲线为 L_i ,共有 n 天的历史样本数据。将这 n 天的负荷曲线持续排列,得到由 $n \times T$ 个点组成的时间序列 L

$$L = [L_1, L_2, \dots, L_n] \quad (5)$$

对该时间序列做每 M 个点动平均处理,第 t 个点的动平均值 $\bar{L}_{0,t}$ 为

$$\bar{L}_{0,t} = \frac{L_{t-(M+1)/2} + \dots + L_t + \dots + L_{t+(M+1)/2}}{M} \quad (6)$$

再以天数为单位将动平均处理过后的负荷还原至初始排序, 得到各天的负荷动平均序列 $\bar{L}_{1,t}$, $\bar{L}_{2,t}$, $\dots$ 。可根据皮尔逊系数计算各历史动平均序列的相关性

$$r = \frac{\sum_{t=1}^n (x_{i,t} - \bar{x}_i)(x_{j,t} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (x_{i,t} - \bar{x}_i)^2 \sum_{t=1}^n (x_{j,t} - \bar{x}_j)^2}} \quad (7)$$

如果平均相关性较高则可以用平滑的方式外推预测。本例中每天的采样点数为96点, 所选取的历史样本为9天。取 $M=29$, 按照上述步骤对历史电气化铁路负荷进行, 29点动平均处理, 得到的历史各天的趋势分量如图5所示。

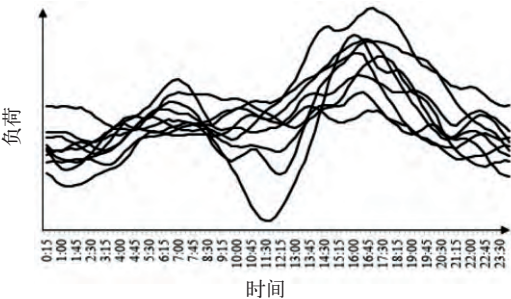


图5 电气化铁路负荷历史各天趋势分量

由图5可以看出历史各天电气化铁路负荷的趋势分量的走势具有较高的相似性。经过计算各天趋势分量的平均相关系数0.76, 表现出了较高的相关性, 因此可以简单的平滑方式进行外推预测。

2. 小波分解重构

将趋势分量 $\bar{L}_i$ 从历史负荷 L_i 中分离后, 得到剩余的分量为

$$P_i = L_i - \bar{L}_i \quad (8)$$

剩余分量成分复杂, 包含各种阶跃分量、低频缓坡分量和高频波动分量, 负荷排列杂乱无序, 建模难度较大, 是电气化铁路负荷建模中需要处理的核心问题。首先对 P_i 进行小波分解至5~7层的频域分量, 再将各个频域分量重构至时域

$$P_i = X_{i1} + X_{i2} + \dots \quad (9)$$

其中 X_{in} 代表第 i 天剩余负荷的第 n 层的时域分量。同样的可根据式(8)计算各天各层时域分量的相关性, 对其中相关性强的分量仍然采用平滑的方式进行外推预测, 最后叠加得高频分量预测结果。

本例中对剩余分量进行7层小波分解, 经过重

构的后时域分量如图6所示。

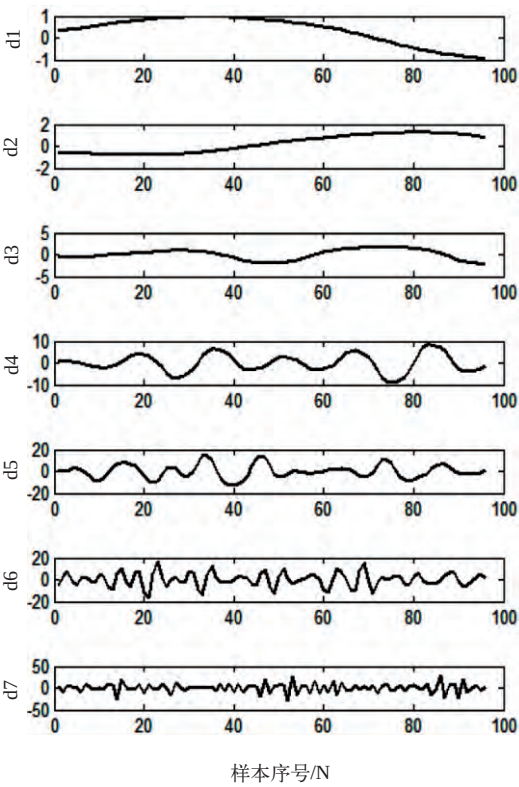


图6 小波分解重构结果

由图6可以看到, $d1 \sim d7$ 为从低到高的频域分量重构结果。 $d1 \sim d5$ 分量的波动频率逐渐增大, 总体曲线较为平缓, 而 $d6$ 、 $d7$ 中由于频率较高已经出现了较多的锯齿波。分别对历史各天的高频分量进行小波, 并比较同一种频率分量在各天的相关系数, 计算结果如表2所示。

表2 各频率分量平均相关系数

频率分量	平均相关系数
d1	0.98
d2	0.86
d3	0.81
d4	0.74
d5	0.65
d6	0.47
d7	0.23

结合图6及表2可分析出, $d1 \sim d5$ 的曲线较为平滑, 相关系数在0.65以上, 规律性较强, 可分别作平滑外推预测; 而 $d6$ 、 $d7$ 曲线中的锯齿波动较多, 相关系数较小, 属于无规律的随机高频分量, 建模的时候可以考虑直接剔除不予处理。按照式(8)所示的方式采用 $d1 \sim d5$ 进行叠加重构, 得到的重构拟合结果与实际的高频分量对比图7所示。

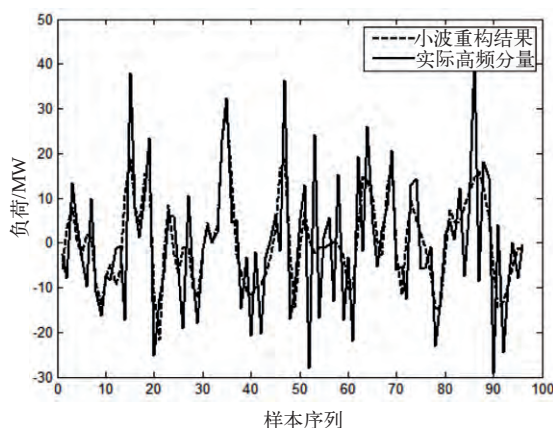


图7 小波分解重构结果对比

由图7可看到,经过5层频率分量的分解重构,得到的拟合结果已十分接近实际的高频分量曲线。其中少数的大幅度尖峰存在一定误差,这是因为5层以上的频率分量被忽略,这部分里面往往含有幅值较高的冲击性分量(由图6中d7的尖峰幅值可看出),具有不可预测性。

3. 平滑叠加预测

以各个高频时域分量的历史平均值作为待预测日对应分量的平滑预测值。对趋势分量也通过类似的方式进行预测,最后将各分量的预测结果叠加得到整体的电气化铁路负荷建模预测结果,与实际负荷的对比如图8所示。

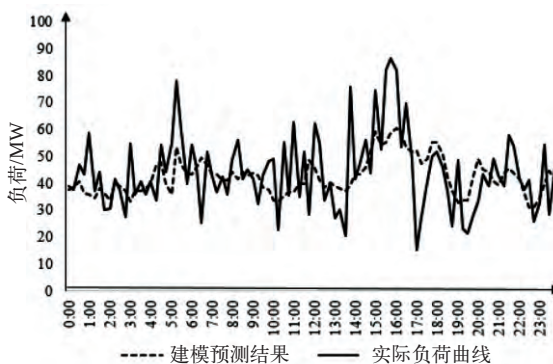


图8 电气化铁路负荷建模预测结果对比

由图8可以看到,经过本文所提的到电气化铁路负荷建模预测方法得到预测结果能够基本跟踪实际负荷的发展趋势,经计算其预测均方根误差为12.5%,显示出对高铁负荷随机波动的良好的跟踪预测能力。

通常来讲电气化铁路负荷不会超过地区总负荷的10%,而应用本文所提出的方法得到的电气化铁路负荷预测误差10%左右,这意味这电气化铁路负荷对电网的冲击仅在1%左右,完全可由大电网自行消纳而不会对电网运行造成负面影响。

结束语

本文从我国电气化铁路发展现状、对电网的影响出发,论述了牵引负荷的微观形成机理和负荷特性,介绍了借鉴自股票市场的均线理论及具有优秀时频转换能力的小波分析理论,在此基础

建立了一种基于波形分解的电铁负荷研究模型,对其建模过程进行了详细论述,并通过某电气化铁路较为集中的地市的具体算例测试模型,验证了本文研究思路的正确性。

电气化铁路负荷强冲击、高随机性建模预测一直是困扰着电力系统调度部门的难题。未来随着我国高速铁路网的大规模发展,电气化铁路负荷的管理将越来越成为各地区维持电网平稳运行的关键问题。本文仅从数学建模的角度讨论了一种可能的参考方法,存在算法自身的适用范围等局限。未来还需要根据各地区的电气化铁路发展状态从电梯负荷本身及其相关影响因素出发进行更深入的研究和探讨,有待后续工作的进一步开展。EA

(收稿日期: 2015.12.10)

(编辑: 杨得润)