

报名序号： 2401

赛题题目： 高铁牵引供电系统运行数据分析及等值建模

## 赛题题目：高铁牵引供电系统运行数据分析及等值建模

### 摘 要

高铁在民生发展和社会生活中起着日益重要的作用,而其运行而产生的大量电量与能耗,以及高铁动车组的单相性、非线性、冲击性等特点,使得其运行时会对电网造成较大影响。因此,对高铁牵引系统的电气特性分析、节能降耗分析、牵引负荷预测以及精确等值建模具有重要的研究意义和社会价值,这正是本文所聚焦的重点。

首先,本文基于牵引变电所测得的大量实测三相电压电流数据,包括空载、牵引、制动三种典型工况,对其作 FFT 进行了频谱分解,得到了幅频和相频谱图,并对各工况下电流的谐波分量进行了计算和分析。基于频谱图所分解出的三相基波幅值和相位,根据对称分量法可求出其正序、负序、零序分量,进而利用矢量旋转叠加法画出各序分量图,从而可直观地比对各种工况下的电压电流不对称度。此外,还绘制出了整个时间段内的正负零序、三次谐波、瞬时功率随时间的变化曲线,并从瞬时功率变化曲线入手划分了各运行时间段分析了功率、谐波、序分量之间的关系与变化规律。

接着,针对题目所述要求进行两种再生制动能量利用方案的方案设计、拓扑搭建与系统构建,随后基于问题 1 中瞬时功率的计算结果,统计了高速动车组运行时消耗和回馈的电量并以其为基本数据测算了不同方案的降低能耗收益,进一步通过计算出不同方案的系统成本,得到不同方案的全寿命周期收益。基于前述系统构建与计算的结果,从经济性、技术特点、安全性和储能容量利用率进行了详细的定性与定量分析。

然后,由于不同车型进站时的功率需求曲线不一样,基于某变电所一整天内的有功功率实测数据,可以提取出特征波形,分类并通过各要素比对进行相关性分析,可以将任一类特征波形和动车运行状况一一对应。采用回归方法可以将实时负荷转变为典型牵引负荷曲线与残差的和,使用正态分布能较好地拟合残差的分布。通过以上的模型即可基于时间表对牵引负荷进行预测,得到了预测结果并和现实对比有较好的准确度。

最后,为了完善和发展我们的模型,之前都是基于实测数据进行了分析和建模,而此处我们基于牵引供电系统的电气特性,对电网、牵引变压器、电力电子变换器、动车负荷作出了数学模型建立。其中,电网的建模是基于传输线的分布参数模型。牵引变压器的建模是基于 V/v 接线下电流相量的关系及变换,由此分析了负荷接入所引入的负序电流,且分析结果与先前实测序分量图的结果相吻合。电力电子变换器的建模是基于变换器端电压的傅里叶级数展开,由此可分析开关管频繁通断所引入的谐波分量。动车负荷的建模是基于异步电动机的三阶机电暂态模型。

**关键词: 对称分量法, 再生制动能量利用方案, 相关性分析, 线性回归, 动态负荷预测, 等值模型建立**

## 一、问题重述

### 1.1 问题背景

高速列车作为我国铁道运输的一个重要的发展方向,对国家的发展、社会的进步、民生的福利等都有着十分重大的意义。作为随机性集群冲击负载的典型代表,随着国家高铁战略不断推进和“一带一路”的不断发展,电气化铁路有着极为广阔的发展前景。

作为一类负载,电气化铁路的用电具备冲击性、非线性、不平衡等特性及交互影响,使得高速动车组在运行的过程中将会给区域电网带来电压、电流不平衡的问题,恶化电网质量并给电网的运行调度带来不利的影响。

### 1.2 问题重述

在上述背景之下,如何对含高铁牵引负荷的区域电能质量进行评估、制定对应的节能降耗策略并且对牵引负荷进行精准预测就变得尤为重要,而要实现上述目标,我们需要依次解决下列问题:

#### 问题 1: 电能质量评估

结合实测电压、电流数据,分别计算和分析空载、牵引、制动三种工况下,电压电流的正负零序分量及不平衡度,作出电流频谱并进行谐波分析。最后,取全部数据作出正负零序、三次谐波、瞬时功率随时间的变化曲线,对其进行分析,找出功率与不平衡度和谐波的关系。

#### 问题 2: 节能降耗方案

统计动车组的消耗和回馈电量,结合电价、储能装置参数,设计再生制动能量利用方案,并测算和比较其在降低动车组能耗方面的收益。

#### 问题 3: 动态牵引负荷精确预测

根据某一天内的有功功率实测数据,提取和构建各种车型及方向的动态牵引负荷数据库,并应用回归等方法构建相应的动态牵引负荷模型库,实现高铁牵引变电所牵引负荷的模拟和电量的精准预测。

#### 问题 4: 高铁牵引变电所-牵引负荷等值建模

为深入研究高速动车组对电网的影响,构建反映高速动车组运行电气特性的数学模型,并模型其与实测数据之间的误差。

## 二、问题分析

### 2.1 问题 1: 电能质量评估

现已测出一段时间内的三相电压电流波形,对波形作 FFT 可以得到其对应的频谱,包括幅值-频率和相位-频率谱,进而可求出各次谐波分量的大小。还可以根据频谱图求出基波的幅值和相位,根据对称分量法可以求出各相的正序、负序、零序分量,也可以基于相量平移、旋转、叠加画出序分量图。

将序分量、三次谐波、瞬时功率的时域波形图画出来,对各阶段作比对分析可以找出功率与不平衡度和谐波的关系。

### 2.2 问题 2: 节能降耗方案

由题设要求需要进行两种不同再生制动能量利用方案的设计,基于问题 1 中的相关计算结果可以统计出高速列车在运行时消耗和回馈的电量,最后基于方案设计、拓扑搭建、系统构建,我们可以从经济性、技术特点、安全性以及储能容量利用率等方面对建

立的两个方案进行优劣对比与分析。

### 2.3 问题 3：动态牵引负荷精确预测

根据实测的全天有功功率变化曲线,提取出许多有功功率需求序列,构建出动态牵引负荷数据库并对其进行分类和辨识,对同一类的负荷曲线作平均化。平均曲线与实测曲线不是完全重合,说明存在一定的噪声使得实测曲线略有误差,求出并统计平均曲线与实测曲线的误差直方图,假定误差呈正态分布,则可根据所统计直方图拟合出噪声的正态分布曲线。利用线性回归拟合平均曲线,构建动态牵引负荷模型库,就能实现对高铁牵引变电所任意车型的动态牵引负荷的模拟和电量精准预测。

### 2.4 问题 4：高铁牵引变电所-牵引负荷等值建模

从能量流动的角度来看,牵引工况下,电网的电能经变压器变换后,经交-直-交变换器以改善电能质量,最后供能给负载。制动工况下则相反。因此,为深入研究高速动车组对电网的影响,可考虑对电网、变压器、变换器、负荷都作等值建模,列出特性方程或求出电量参数。

## 三、模型假设

1. 进行再生制动能量利用系统方案设计时,假设系统的损耗主要来自于变流器损耗、超级电容非理想充放电过程、超级电容自身的功率与容量特性以及牵引列车运行工况的变化;
2. 在对高速动车组消耗和回馈的电量进行统计以及进行后续的经济效益分析时,认为题目给出的数据可以代表该站点的长时间稳定工作状态;
3. 假设该车站的“空窗期”为 9 小时,即有效运行时间为 15 小时;
4. 忽略驾驶员的个人因素对车辆运行的差别影响

## 四、符号说明

符号	说明
$Benefit_{max}$	降低能耗收益最大值
$k_{energy-Loss1}$	储能型方案降低能耗修正系数
$k_{energy-Loss2}$	储能-能量回馈型复合方案降低能耗修正系数
$k_{SC}$	超级电容充放电过程及功率容量修正系数
$k_{load}$	牵引机车运行工况变动修正系数
$k_{stray-Loss}$	其余杂散损耗系数
$Benefit_1$	储能型方案降耗收益
$Benefit_2$	储能-能量回馈复合型方案降耗收益
$P(t)$	动态牵引负荷
$P_0(t)$	典型有功功率序列
$\varepsilon$	随机变量负荷
$R^2$	拟合优度

## 五、问题一 电能质量评估

高速动车组负荷的非线性、单相性、冲击性会给牵引供电系统的引入谐波、负序等问题,影响电能质量。为此,需对牵引供电系统的电能质量进行评估。现已测出一段时间

内的电压、电流,且包含了空载、牵引、制动三种工况,下面对这三种工况的数据作数据处理,以评估其电能质量,并进一步地对该段时间内所有数据作总电能质量分析。

针对采集到的电量信号,对其作 FFT,就可以得到该信号的幅值-频率和相位-频率谱,将其作于图上,就可直观地看到电信号的各谐波分量及分布。

根据频谱图可得到三相电量的基波幅值和相角,可以根据对称分量法求出其各相正负零序分量,其中 $a = e^{j120^\circ}$ 。

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{A2} \\ \dot{I}_{A0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

本节只求取 A 相的正负零序分量,其余相的序分量可由 A 相序分量经旋转得到。

## 5.1 典型工况下的电能质量评估

### 5.1.1 空载工况 (1:4000)

表 5-1 序分量及其不平衡度

序分量	不平衡度
Va1=189131 V	
Va2=1555.42 V	负序电压不平衡度 $\epsilon_{U2} = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% = 0.82\%$
Va0=2258.41 V	零序电压不平衡度 $\epsilon_{U0} = \frac{U_0}{U_1} \times 100\% = 1.194\%$
Ia1=3.52 A	
Ia2=1.741 A	负序电流不平衡度 $\epsilon_{I2} = \frac{I_2}{I_1} \times 100\% = 49.46\%$
Ia0=1.047 A	零序电流不平衡度 $\epsilon_{I0} = \frac{I_0}{I_1} \times 100\% = 29.74\%$

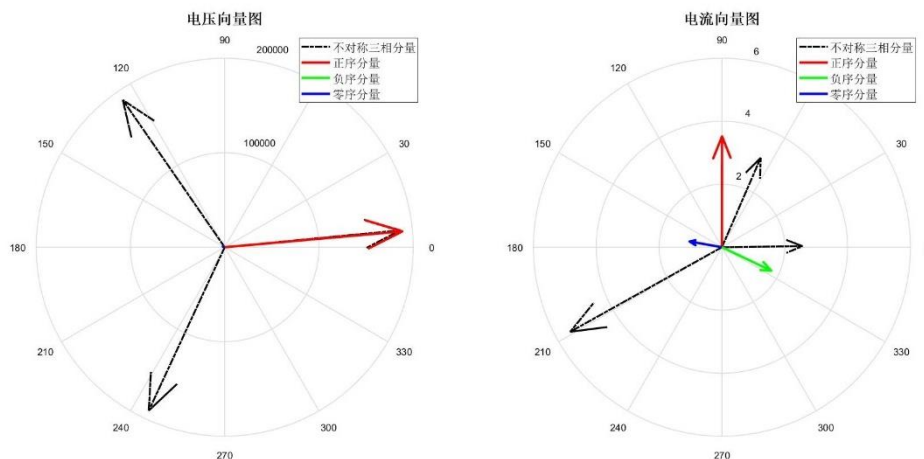


图 5-2 序分量图

由序分量计算结果和序分量图可见,空载情况下,电压不平衡度很低、接近三相对称,但电流不平衡度很高、分解出的负序和零序分量较大。原因是电压由电网维持以保证其不平衡度尽可能低、谐波尽可能小,但电流是受负载影响的,空载时电流较小,因此易受线路噪声和电磁干扰,导致其不平衡度高。

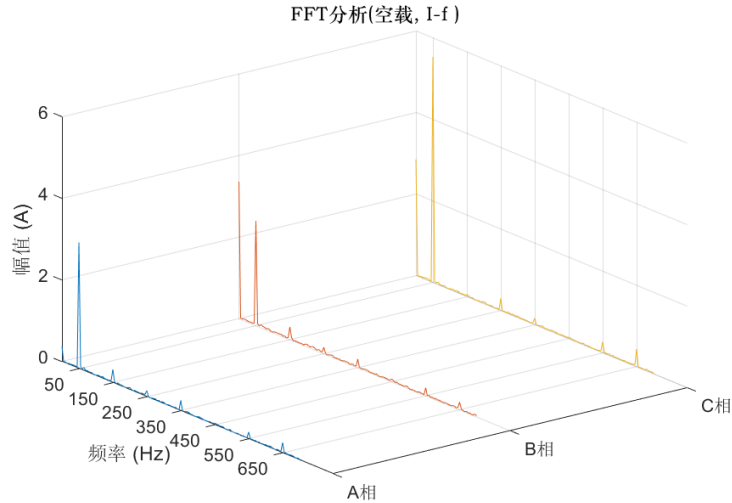


图 5-2 电流频谱

表 5-2 空载时的电流谐波分量分析

前五大电流谐波分量		一	二	三	四	五	THD <sub>I</sub>
A 相	幅值(A)	0.3249	0.2544	0.2498	0.1652	0.1508	0.1983
	频率(Hz)	150	350	650	550	250	
B 相	幅值(A)	0.3104	0.2131	0.1948	0.1888	0.1545	0.2253
	频率(Hz)	150	350	550	650	250	
C 相	幅值(A)	0.4335	0.2995	0.2652	0.1570	0.1209	0.1262
	频率(Hz)	650	250	550	350	950	

由电流频谱和谐波计算结果可见,空载时三相电流谐波都比较大,原因跟不平衡度一样,也是因为空载时电流较小,更容易受到噪声波动和电磁干扰。而且,谐波多集中于三次、五次、七次、十一次谐波等。没有偶次谐波是因为奇函数的傅里叶分解不含偶次分量。

然而实际上,由于空载时牵引网本身就没有对任何负荷供电,因此对其电流的不平衡度和谐波分析时没有实际意义的,这里的分析仅对后续带载时的分析起比对作用。

### 5. 1. 2 牵引工况 (160, 0001 : 160, 4000)

表 5-3 序分量及其不平衡度

序分量	不平衡度
Va1=189027 V	
Va2=1571.67 V	负序电压不平衡度 $\epsilon_{U2} = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% = 0.831\%$
Va0=2271.53 V	零序电压不平衡度 $\epsilon_{U0} = \frac{U_0}{U_1} \times 100\% = 1.202\%$
Ia1=22.312 A	
Ia2=23.275 A	负序电流不平衡度 $\epsilon_{I2} = \frac{I_2}{I_1} \times 100\% = 104.3\%$
Ia0=0.905 A	零序电流不平衡度 $\epsilon_{I0} = \frac{I_0}{I_1} \times 100\% = 4.06\%$

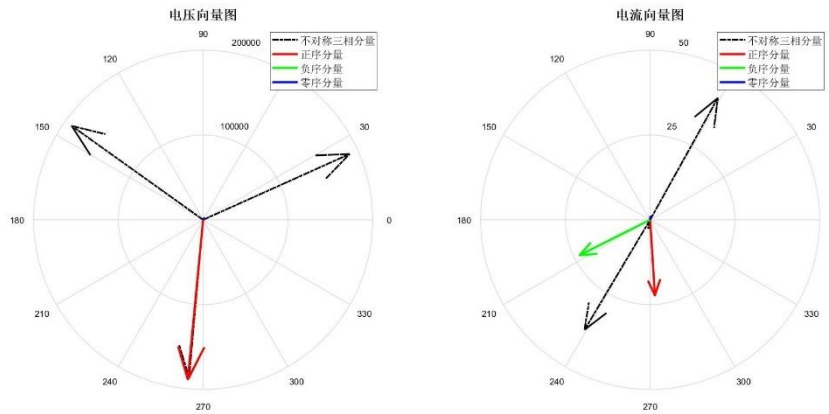


图 5-3 序分量图

由序分量计算结果和序分量图可见,牵引工况下,电压仍保持良好对称性。而电流相比于空载,不仅幅值大大提升,而且负序电流也大幅提升,负序电流近似与正序电流为同一量级,这也意味着负序不对称度极大,出现这种现象的原因将在问题四中建模解释。而零序电流相比于空载变化不大,且由于正序电流幅值大大提升,因此零序不对称度大大降低了,直观体现在序分量图中几乎看不到零序分量。

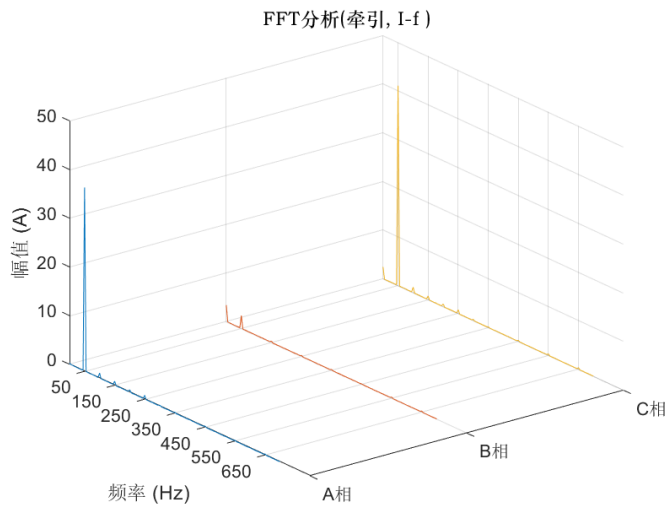


图 5-4 电流频谱

表 5-4 牵引时的电流谐波分量分析

前五大电流谐波分量		一	二	三	四	五	THD <sub>I</sub>
A 相	幅值(A)	1.079	0.839	0.815	0.506	0.250	
	频率(Hz)	100	150	250	200	450	
B 相	幅值(A)	0.305	0.241	0.223	0.204	0.193	0.229
	频率(Hz)	150	650	550	350	250	
C 相	幅值(A)	1.129	0.776	0.751	0.533	0.362	0.044
	频率(Hz)	100	250	150	200	650	

可见,牵引工况下 A、C 相的电流总谐波畸变率 THD 大幅度减小。这主要是因为 A、C 相电流幅值大幅提升,而谐波电流幅值相比于空载提升得不多,因此谐波(尤其是噪声)相对于基波就相对减小了很多,这一点从电流频谱图可以很直观地看出来。当然,从绝对幅值上看,负载的接入还是引入了些许谐波,A、C 相的谐波绝对值比空载的时候略微变大了,但有赖于电力电子技术的发展,现在电力动车组大多是通过带有功率因数校正或高频

PWM 控制的电力电子整流/逆变器与馈电网相连的,因此动车组负载对电网的谐波污染并不大,引入的谐波还是相当小的, THD 不超过 5%.

但是 B 相电流 THD 仍然很大,比对可发现 B 相电流与空载相比几乎没有变化,可以推知这是因为动车组是单相负载,这个单相负载挂载在了 A、C 相间,因此 A、C 相电流大幅增长以驱动电机,而 B 相仍相当于空载。同样,空载的 THD 分析是没有意义的。此外,谐波中出现了偶次谐波,推断是因为单相负载的接入导致电流波形不再呈奇函数,破坏了波形的对称性,因此傅里叶分解就会出现偶次分量。

### 5. 1. 3 制动工况 (400, 0001 : 400, 4000)

表 5-5 序分量及其不平衡度

序分量	不平衡度
Va1=189331 V	
Va2=1392.68 V	负序电压不平衡度 $\epsilon_{U2} = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% = 0.736\%$
Va0=2286.75 V	零序电压不平衡度 $\epsilon_{U0} = \frac{U_0}{U_1} \times 100\% = 1.208\%$
Ia1=20.636 A	
Ia2=19.965 A	负序电流不平衡度 $\epsilon_{I2} = \frac{I_2}{I_1} \times 100\% = 96.75\%$
Ia0=0.901 A	零序电流不平衡度 $\epsilon_{I0} = \frac{I_0}{I_1} \times 100\% = 4.366\%$

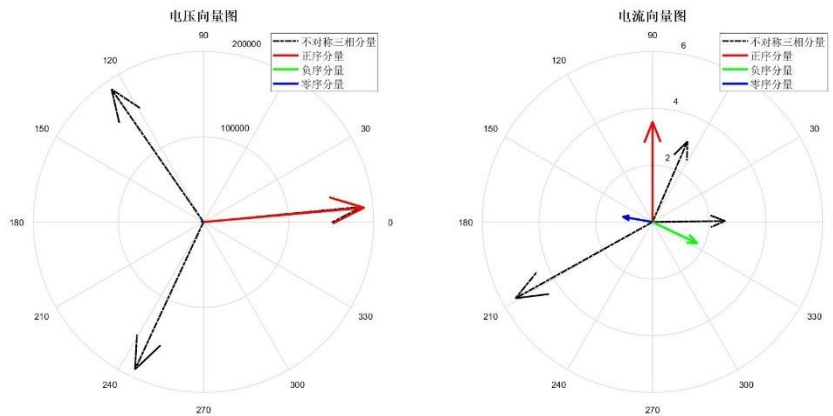


图 5-5 序分量图

FFT分析(制动, I-f)

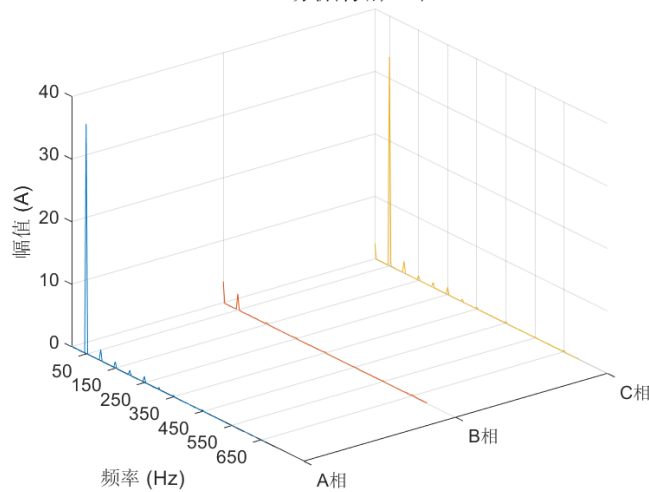


图 5-6 电流频谱



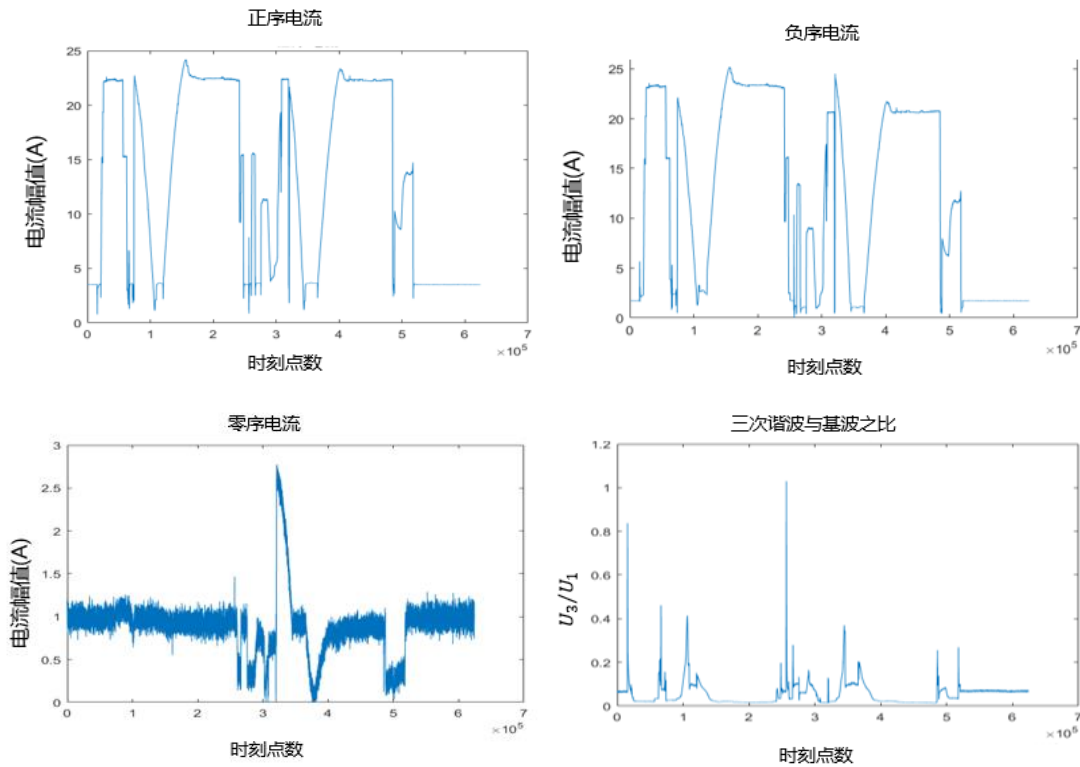
表 5-6 制动时的电流谐波分量分析

前五大电流谐波分量		一	二	三	四	五	THD <sub>I</sub>
A 相	幅值(A)	1.855	1.071	1.014	0.839	0.399	0.071
	频率(Hz)	100	150	250	200	300	
B 相	幅值(A)	0.284	0.235	0.180	0.173	0.135	0.218
	频率(Hz)	150	650	350	250	550	
C 相	幅值(A)	1.882	1.194	0.792	0.743	0.414	0.078
	频率(Hz)	100	250	200	150	300	

无论是序分量还是谐波分量,制动工况和牵引工况是差不多的。在之前的分析中我们已经知道牵引工况下负序增大和 THD 下降都是因为单相负载接入且流过大电流。制动工况也是一样的,只不过电流的方向是反的,从电网向动车注入能量的牵引电流转为了从动车向电网回馈能量的制动电流,因此制动工况也是呈现负序大而谐波小的特点。

### 5.2 整个时间段内的电能质量分析

绘制电流正序、负序、零序、三次谐波与基波的比值、瞬时功率随时间变化的曲线,如下:



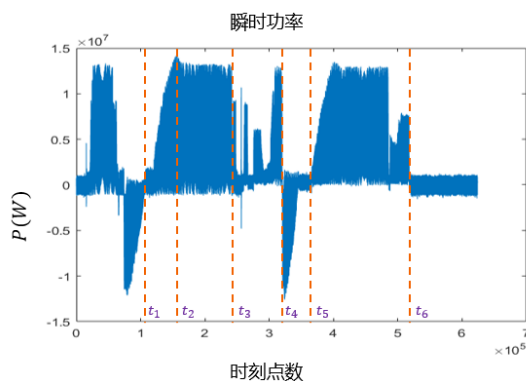


图 5-7 电能质量随时间的变化曲线

可以从瞬时功率图入手进行分析。如图,标出了几个关键时刻节点 $t_1 \sim t_5$ 。

$t_1 \sim t_2$ 时段,动车入网,电网开始给动车供能并持续上升。此时,正序电流和负序电流都在持续上升,以逐步增大供能。零序电流基本保持不变。三次谐波略有波动但变化不大。

$t_2 \sim t_3$ 时段,经历一个小冲激后功率趋于稳定,该冲激可能是因为信号控制系统的超调或高阶机电系统的振荡引起的。 $t_2$ 是牵引功率最大的时刻。稳定时段内,电网向动车提供稳定的牵引能量,此时处于牵引工况。正序和负序电流都较大且近乎相等,零序电流很小,而三次谐波与基波之比几乎为零,这与上一小节的工况分析相符合。

$t_3 \sim t_4$ 时段,经历了一个振荡时段,推测可能是信号控制系统正在作出信号调节导致的。此时,各序电流也随能量一起振荡,而三次谐波出现了一个尖峰,尖峰是系统状态跳变的瞬间引起的电量跳变导致的,可见系统状态的跳变导致的尖峰会引入很大的瞬时谐波。

$t_4 \sim t_5$ 时段,系统由牵引工况转为制动工况,能量从正输送转为负回馈, $t_4$ 是制动功率最大的时刻,并随着动车速度的逐步降低、回馈功率也逐渐降低。这段时间内,正负序电流随功率逐步降低,零序电流仍维持不变,三次谐波除了状态切换瞬间有个小尖峰之外其他时候都较小。在由牵引切换到制动工况的瞬间,各电量都出现了尖峰,其中以零序电流的尖峰最为明显。

$t_5$ 之后又是一个牵引时段,过程与前述相同。

$t_6$ 之后,没有动车入网了,系统处于空载状态。此时,正负序电流很小,而零序电流相对较大,三次谐波也比牵引阶段时的大,与上一小节的工况分析吻合。注意此时瞬时功率看上去仍在不断小幅波动,但其正负波动程度几乎相同,取平均之后可知平均功率(有功功率)是近似为0的。

由以上分析和波形图可知,负序不平衡最严重的时段是牵引时段,此时三次谐波含有率最小。零序不平衡最严重的时刻是牵引向制动工况切换的跳变瞬间,此时三次谐波含有率也发生了一个小跳变。

正如前面已经分析的,牵引功率最大的时刻是 $t_2$ 时刻,制动功率最大的时刻是 $t_4$ 时刻。牵引阶段,牵引功率较大且稳定,此时负序不平衡度高、零序不平衡度低、三次谐波很小,原因在“典型工况的电能质量评估”中已解释。制动阶段,制动功率较大且逐步减小,刚开始制动的瞬间零序不平衡度极高、三次谐波也有跳变,但之后零序不平衡度和三次谐波都会逐渐降下来。

## 六、问题二 节能降耗方案

### 6.1 高速动车组消耗及回馈电量统计

基于问题 1 中瞬时功率的计算结果,可以对牵引变电所消耗和高速列车回馈的电量

进行统计，由电流的时域表达式推导有功功率的表达式如下所示：

$$P = \frac{\int_0^T p(t) dt}{T} \quad (2)$$

为了计算牵引变电所消耗和高速列车回馈的电量，需要对正负有功功率分别进行积分求解，求解的表达式如下：

$$P_{positive} = \frac{\int_{T_{positive}} P dt}{T_{positive}} \quad (3)$$

$$P_{negative} = \frac{\int_{T_{negative}} P dt}{T_{negative}} \quad (4)$$

经求解可得在问题一所规定的求解范围之内（31200000 个采样点的持续时间），牵引变电所消耗的电量为 1366.7kW·h，高速列车通过再生制动回馈（根据方案不同也不一定是“回馈”的电量）的电量为 180.43kW·h。

## 6.2 置于车载储能的再生制动能量利用方案

我国高速列车领域相关棘手飞速发展，在其面临的众多关键问题当中，再生制动能量利用率的提高有着十分重要的地位，在重载、长大坡道线路等运行工况时，再生制动的能量甚至可以达到牵引能量的 10%~30%，提高再生制动能量利用率的问题亟待解决。<sup>[4]</sup>

电气化铁路交流传动系统的基本拓扑结构如图 6-1 所示，能量流动原理图如图 6-2 所示，在电力机车进入再生制动状态之后，牵引电机此时工作在发电状态，能量由工作在整流模式的变流器经由中间直流环节通过工作在逆变模式的变流器转换为单相交流电，然后该交流电再通过受电弓反馈给 27.5kV 接触网，能量最后反向流动接入电网，再生制动的能量流向如图 6-2 中虚线所示；而当电力机车工作在电动机状态时，此时的能量流动过程与发电机状态相反，如图 6-2 中实线箭头所示<sup>[6]</sup>。

综上即为电气化铁路再生制动技术的原理与工作方式，而针对其通过再生制动得到的能量，现有的回收方案主要有耗能型、直接回馈型、独立站点回馈型和储能型四种。

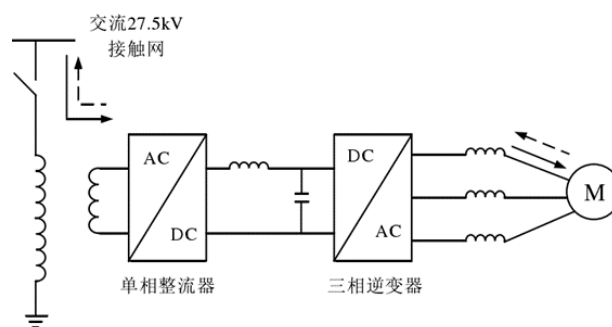


图 6-1. 交-直-交传动系统工作原理图

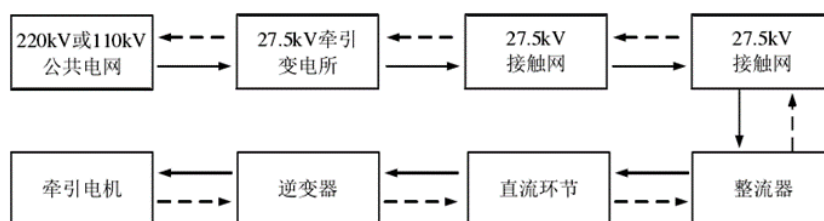


图 6-2. 电气化铁路交流传动系统能量流动框图

- 1) 耗能型利用方案是指借助耗能电阻将再生制动得到的能量以热能的形式耗散掉，其基本结构如图 6-3 所示<sup>[6]</sup>；

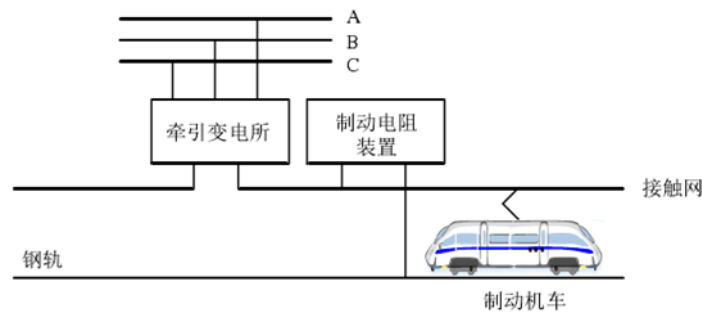


图 6-3. 耗能型再生制动能量回收利用方案原理图

- 2) 直接回馈型是指将接入同一供电臂的制动列车产生的再生制动能回馈至牵引列车或低压配电系统的其他用电设备，其基本结构如图 6-4 所示<sup>[6]</sup>；

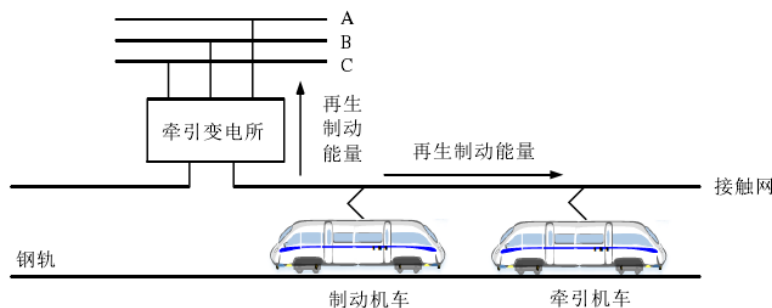


图 6-4. 能量回馈型再生制动能量回收利用方案原理图

- 3) 独立站点回馈型是能量回馈利用技术的另外一种方案，该方案将再生制动产生的能量通过一系列中间环节变换为交流电回馈给 10kV 电力供电网络<sup>[6]</sup>；
- 4) 储能型方案则是指采用储能装置实现再生制动能量的存储与释放，按需实现功率的调配，其基本结构如图 6-5 所示，针对题目所设问题，我们主要针对独立站点回馈型和储能型这两种进行展开探讨；

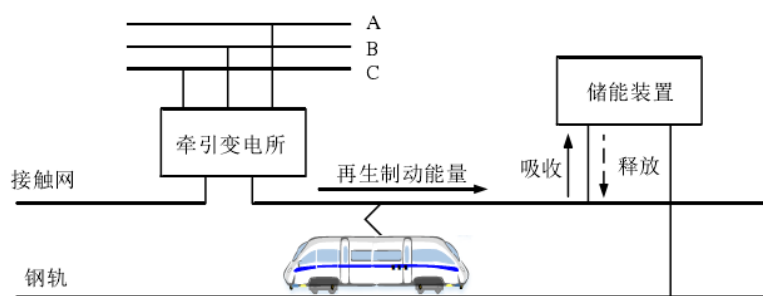


图 6-5. 储能型再生制动能量回收利用方案原理图

如图 6-6 所示为基于超级电容的再生制动能量存储方案拓扑，主要由下述三个部分组成：

- 1) 牵引供电系统负责将区域电网侧的三相电压变为两相 27.5V 的单相电压分别供给两个牵引供电臂；
- 2) RPC（铁路功率调节装置）其实就是共用直流侧电容、采用背靠背结构的两个电压源逆变器；
- 3) 储能系统以 SC（超级电容）储能介质，通过双向 DC/DC 变换连接至直流侧，

用于实现能量的存储和释放<sup>[5]</sup>。

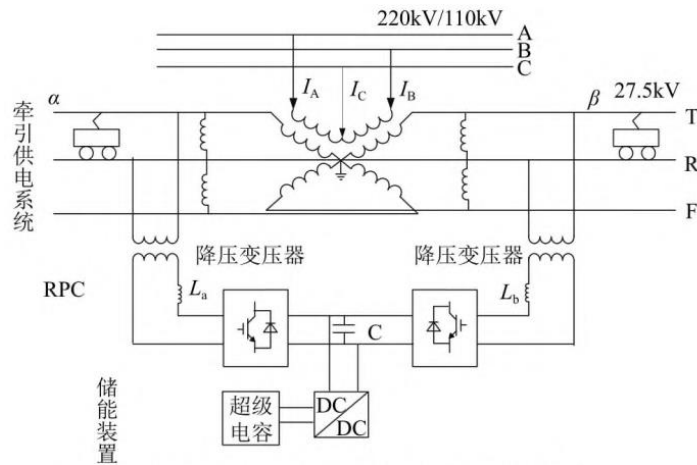


图 6-6. 基于超级电容的再生制动能量存储方案拓扑结构

### 6.3 置于牵引变电所的再生制动能量利用储能方案

如图 6-7 为考虑能量回馈的再生制动能量利用系统拓扑，与前一种单纯的储能方案相比，此方案中背靠背换流器的直流侧电压接在直流母线上，直流母线电压不仅可以双向 DC/DC 实现超级电容储能，也可以通过并网逆变器将能量馈送给铁路 kV 电力贯通配电系统。以 Simulink 为平台搭建的仿真拓扑如图 6-8 所示<sup>[9-11]</sup>（拓扑结构示意图，由于时间限制不包括采样与控制部分）。

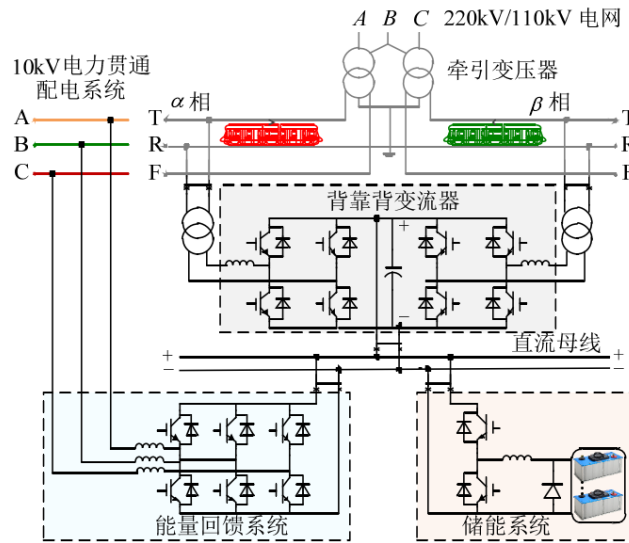


图 6-7. 考虑能量回馈的再生制动能量存储方案拓扑结构

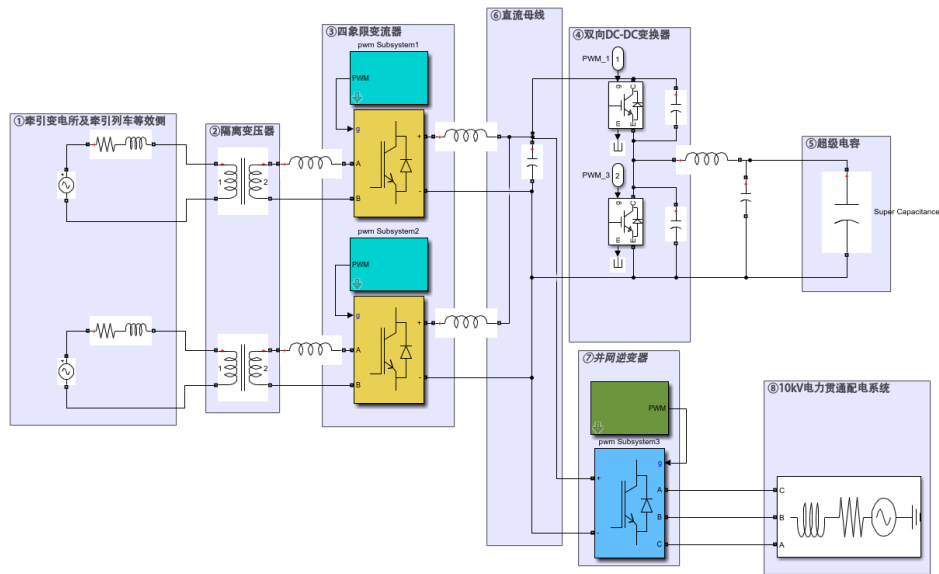


图 6-8. 考能量回馈的再生制动能量存储方案 Simulink 仿真拓扑

#### 6.4 电力电子接入与控制方案

由前述方案可知我们主要有两种方案：

- 1) 置于车载储能的再生制动能量利用方案——储能型方案；
  - 2) 置于牵引变电所的再生制动能量利用储能方案——储能-能量回馈型复合方案；
- 针对这两种电力电子方案，我们首先制定了如下基本系统管理原则：

- 1) 再生制动能量优先供给同一牵引供电臂下的牵引列车，其次满足不同牵引供电臂下的牵引列车以实现能量的转移使用；
- 2) 在再生制动能量完全满足牵引列车的功能之后，剩余的能源优先进行能量回馈送给 10kV 配电系统，若还有剩余，则对超级电容进行充电实现能量存储。

由已规定的基本原则和系统原理架构，可知储能型方案有工况 A1、A2，储能-能量回馈复合型有工况 B1、B2、B3，具体情况如表 6-1 所示。

表 6-1. 两种再生制动能量利用方案运行工况展示

方案	工况	系统工作状态	备注
储能型方案	A1	储能系统放电	牵引供电系统总功率 $> 0$
	A2	储能系统充电	牵引供电系统总功率 $< 0$
储能-能量回馈型复合方案	B1	储能系统放电 回馈系统待机	牵引供电系统总功率 $> 0$ 储能系统释放能量
	B2	储能系统充电 回馈系统馈电	牵引供电系统总功率 $< 0$ 回馈系统馈送能量达到系统上限
	B3	储能系统待机 回馈系统馈电	牵引供电系统总功率 $< 0$ 回馈系统馈送能量未达系统上限

由此可以得到基本的系统级管理与控制策略流程图如图 6-9 所示，使得各变流器能够在不同的运行工况之下实现协调的运行。

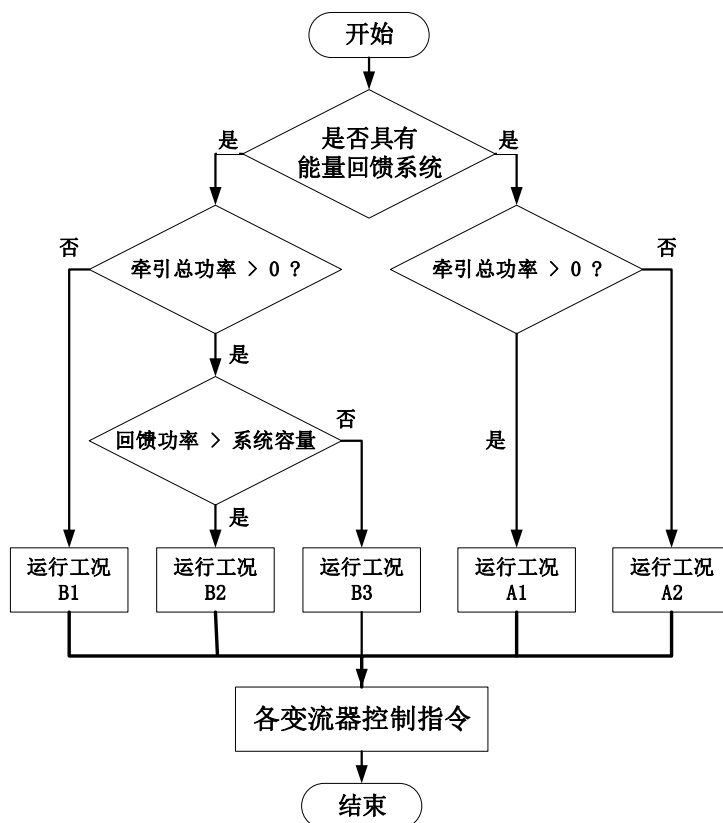


图 6-9. 系统级管理与控制策略流程图

## 6.5 电力电子控制方法概述

在系统工作的过程当中，为了使系统具备良好的系统性能与控制特性，实现再生制动能量的高效利用，需要整个系统协调配合进行高效合理控制。本系统工作在主从工作模式，使 RPC 一侧变流器工作在主模式，另一侧工作在从模式，双向 DC/DC 变换器和并网逆变器也工作在从模式。主模式变流器负责维持母线电压，实现功率外环跟踪，从模式变流器、DC/DC 变换器和并网逆变器则依据系统的功率控制指令调节自身的工作状态与输出。

各变换器的基本控制策略如表 6-2 中所述。

表 6-2. 各变换器基本控制策略

变换器	基本控制策略	控制目标
RPC (背靠背变流器)	电压、电流双闭环	直流母线稳压、功率跟踪
储能系统	恒功率控制	实现储能介质充放电控制
能量回馈系统	功率闭环控制	实现回馈功率跟踪

## 6.6 经济效益分析

由相关标准及规定可知，高速铁路电费的收费采用大工业两部制定价，其中包括基本电费、电度电费、功率因数调整电费以及附加电费<sup>[7]</sup>。对于牵引机车这种负载来说其收费有一定的特点，首先由于高铁列车的功率因数接近于 1，因此几乎不存在功率因数罚款；另外对馈送回区域电网的再生能量，由于其具有较大的负序分量而对电网供电质量造成危害，电力公司一般采用反送正计或者反送不计的计费方式。因此综上所述，不管是从反送计费的角度还是从利用再生制动能量进行有效驱动的角度来看，都体现了再生制动能量利用率的提高可以带来相当可观的经济效益。

## 6.7 储能型方案的经济效益与降低能耗收益分析

若要对再生制动能量方案进行评估分析，我们需要对其能够带来的经济效益与在降低能耗方面的收益进行分析计算。

### 1) 降低能耗收益

由前述计算可知，在 26min 即 13/262800 年(31200000 个采样点)的持续时间当中，牵引变电所消耗的和高速列车回馈的电量分别为 1366.7KW·h 和 180.43kW·h，由此可得在一年以内消耗和回馈的电量分别为：

$$1366.7 \times \frac{365 \times 24 \times 60}{26} \times \frac{1}{1000} = 27628.366MW \cdot h \quad (5)$$

$$180.4279 \times \frac{365 \times 24 \times 60}{26} \times \frac{1}{1000} = 3647.419MW \cdot h \quad (6)$$

在一天以内消耗和回馈的电量分别为：

$$1366.7 \times \frac{24 \times 60}{26} \times \frac{1}{1000} = 75.694MW \cdot h \quad (7)$$

$$180.4279 \times \frac{24 \times 60}{26} \times \frac{1}{1000} = 9.993MW \cdot h \quad (8)$$

为了确定进行周期性投资和收益的对比分析，我们需要先确定我们所选的储能方案的全寿命周期，在我们的整个系统中，超级电容是储能的绝对核心部件，由于充放电次数受限，系统的寿命受超级电容的工作状态影响；同时，由文献调研可知变流器各个部件的使用寿命从 15 年到 40 年以上不等，但由于目前中国铁路总公司所规定的高速动车组高级修期限为 12 年（或 480 万公里），因此牵引变流器的强制更换期限为 12 年<sup>[7]</sup>，以百万次充放电次数对超级电容进行寿命估算的估值在 12 年以上，因此综上所述可以设置本案例的系统的寿命周期为 12 年。

在此基础上，基于题目给出的电能的报价，若不考虑超级可以计算得出再生制动产生电能 12 年的运行周期中产生的降低能耗的收益的最大值为：

$$Benefit_{max} = 12 \times 3647.419 \times 0.63 \times \frac{1000}{10000} = 2757.449 \text{ 万元} \quad (9)$$

但是对于储能型系统，电容的并不一定能够充分吸收与释放 RPC 直流侧的能量，能量的吸收与释放与超级电容的容量、功率、充电电压、充电电流以及牵引列车的运行工况都密切相关，是一个十分复杂的系统<sup>[12-14]</sup>，实际中再生制动产生的能量并不能被储能系统充分吸收，而是有部分溢出直接馈送到电网，导致再生制动能量利用率下降且对区域电网造成污染，这就是为什么我们需要设置馈电系统，其他解决方案包括蓄电池-超级电容混合储能系统也是当今的热门研究方向<sup>[6]</sup>。

### 2) 因此在对实际降低能耗收益时我们需要一个电容储能修正系数 $k_{energy-Loss1}$ ，

且有关系  $0 < k_{energy-Loss1} < 1$ 。

$$Benefit_{max} = 12 \times 3647.419 \times 0.63 \times \frac{1000}{10000} = 2757.449 \text{ 万元} \quad (10)$$

降低能耗收益修正公式与电容储能修正系数表达式如下所示：

$$k_{energy-Loss1} = k_{SC} k_{load} k_{stray-Loss} \quad (11)$$

$$Benefit_1 = k_{energy-Loss1} Benefit_{max} \quad (12)$$

式中  $k_{SC}$  为超级电容充放电过程及功率容量修正系数， $k_{load}$  为牵引机车运行工况变动修正系数， $k_{stray-Loss}$  为其余杂散损耗系数。



### 3) 经济效益分析

在本方案中我们需要考虑的成本主要来自：系统集成、隔离变压器、并网逆变器、四象限变流器、双向 DC/DC 变换器以及超级电容。由问题 1 中得到功率时域曲线可得，瞬时功率的最大值即最大需量约为 14MW，由于本系统为纯储能系统，为了在一定参数选择范围以内尽可能增加再生制动能量的利用率，我们选取电容功率为 15MW，同时考虑其充放电特性，选取电容容量为 150kW·h，得到储能系统基本参数为 15MW, 150kW·h，由此基于题目所给储能参数成本，计算得到本方案各模块的成本如表 6-3 所示。

表 6-3. 储能型方案各模块成本

储能系统参数		15MW, 150kW·h
模块名	模块单价/万元	模块总成本/万元
系统集成/MW	5	$5 \times 15 = 75$
隔离变压器/MW	3	$3 \times 15 \times 2 = 90$
并网逆变器/MW	20	0
四象限变流器/MW	20	$20 \times 15 = 300$
双向 DC/DC/MW	15	$15 \times 15 = 225$
超级电容/MW	60	$60 \times 15 = 900$
总成本/万元		1740

#### 6.7.1 储能-能量回馈型复合方案的经济效益与降低能耗收益分析

针对储能-能量回馈型复合方案，再生制动能量优先供给牵引机车，其余的回馈给 10kV 系统，余下的能量再通过双向 DC/DC 变换器由超级电容进行存储。在此种方案下，再生制动能量可以得到充分利用，在不考虑其它复杂因素的情况下，若选择超级电容参数合适，可得降低能耗收益修正公式与电容储能修正系数表达式如下所示，对于储能-能量回馈型复合方案我们有  $0.9 < k_{energy-Loss2} < 1$ 。

$$k_{energy-Loss2} = k_{stray-Loss} \quad (13)$$

$$Benefit_2 = k_{energy-Loss2} Benefit_{max} \quad (14)$$

表 6-4. 储能-能量回馈型复合方案各模块成本

储能系统参数	10MW, 100kW·h	回馈系统参数	8MW
模块名	模块单价/万元	模块总成本/万元	
系统集成/MW	5	$5 \times 10 = 50$	
隔离变压器/MW	3	$3 \times 10 \times 2 = 60$	
并网逆变器/MW	20	$20 \times 8 = 160$	
四象限变流器/MW	20	$20 \times 20 = 400$	
双向 DC/DC/MW	15	$15 \times 10 = 150$	
超级电容/MW	60	$60 \times 10 = 600$	
总成本/万元		1420	

#### 6.8 方案对比分析

针对所构建的两种再生制动能量利用方案，我们可以从经济、技术、安全可靠以及储能容量利用率等方面等角度比较储能型和储能-能量回馈型这两种方案的优劣。

##### 1) 经济性分析

表 6-5. 方案经济收益对比

能量利用方案	储能型方案	储能-能量回馈型复合方案
降低能耗收益/万元	$k_{energy-Loss1} \times 2757.449$	$k_{energy-Loss2} \times 2757.449$
降耗收益估值/万元	1654.47 (系数为 0.6)	2647.15 (系数为 0.96)
系统成本/万元	1740	1420
净收益/万元	-85.53	1227.15
空窗修正净收益/万元	-705.95625	234.46875

由表中数据可得，在 12 年的全寿命周期中，储能型方案的收益为-85.53 万元，并不能产生实际的收益，当然这个收益的实际输出还收到系数的选取，而且系统的工作周期在实际情况当中可能并不止 12 年，因此本方法还是有很好的发展前景。

储能-能量回馈型方案在 12 年的全寿命周期中的收益为 1227.15 万元，远大于储能型方案，由于其能量利用率较高，损耗系数的取值趋近于 1，上升的空间较小，但其能产生的收益依然会随使用年限即工作寿命的增大而显著增大，若使用年限由 12 年增加到 15 年，则本方案的净收益可以达到 1888.94 万元。本方案的净收益较高的原因主要来自以下两个方面：

- a) 储能型方案的再生制动能量利用率很高，产生的能量基本上都可以被系统有效利用，因此也不会馈送到区域电网造成污染；
- b) 储能-能量回馈型复合方案的成本较低，虽然本方案多出了一个储能系统，由此虽然会带来并网逆变器的投资的加入，但由于能量优先牵引、然后馈送，最后储能，使得在其它条件相同的情况下，超级电容的容量和功率都可以大幅减小，进一步也就减小了超级电容的投资。且从前述方案成本表中可以看出，不管是储能型方案还是储能-能量回馈复合型方案，超级电容的投资在总成本中的占比均为最高的一项，分别为 51.72%和 42.25%，因此通过降低超级电容的容量和功率，可以使系统整体成本得到显著降低，收益得到显著增加；另外，虽然没有体现在本模型的计算之中，但“反送计费”罚款的取消也变相带来了额外的收益。

### 2) 技术分析

从技术层面来讲，两个方案有以下性能上的差异：

- a) 储能型方案的拓扑直接由直流母线电压供给以超级电容为代表的储能设备，中间经过的能量变换级数较少，虽然现在变换器的效率已经可以做到比较高的水平，但依然会带来一定的损耗与影响；同时，由于没有向电网馈电的环节，则不需要考虑并网带来的一系列控制层面的问题以及可能会对 10kV 电网带来的影响，包括并网电流追踪控制以及负序电流、谐波电流带来的污染等。
- b) 储能-回馈复合型方案由于需要通过并网逆变器向 10kV 电网馈送能量，因此多一级中间变换的环节，需要考虑中间过程带来的功率损耗；由于需要向电网馈电，因此馈送电能中可能包含的大量负序与谐波电流容易对其它用电设备的稳定与安全运行造成显著的影响；在实际的应用当中，回馈型方案大多采用多绕组单相变压器，由开关的通断决定是否介入馈送电能，经升压后再接入 10kV 电力线路，由于置于线路或变电所，因此可以灵活安排装置的建设与装设方式，且可以成套配合使用。

### 3) 安全性分析

从安全性的角度进行分析，可知二者具有下述差异：

- a) 储能型方案的储能设备安装在高速列车上，若储能系统发生故障，不方便及时切除与脱车，会带来一定的安全隐患；此外，超级电容作为高功率密度的功率

器件，在车上需要承受运行过程中的颠簸与加速减速过程带来的加速度变化，给系统带来了一定的风险，对系统整体的机械强度、减振设计提出了一定的要求；

- b) 储能-回馈复合型方案的储能系统设置在地上，不仅可以利用地面的相关辅助与保护设备，且在回馈系统出现故障工况时可以通过开关将故障部分迅速切除，使其不影响列车的正常运行，极大程度上提升了系统的安全性与可靠性。
- 4) 储能系统特性分析
  - a) 如前文所述，储能型系统需要考虑超级电容的容量与功率导致的再生制动能量不能充分利用的问题，且会导致部分能量馈送给区域电网带来不好的影响，这也是阻碍储能型方案发展的重要因素之一。由于这一板块在前面已经进行了充分的叙述，在这里不做进一步的展开；
  - b) 如前文所述，储能-回馈型复合系统基本不需要考虑储能型系统所阐述的主要问题，再生制动能量利用率高、对区域电网污染小、器件容量和功率降低使成本降低，具有极佳的发展潜力。

在完成前述全部的建模和计算之后，我们还需要对几个问题做简单的说明。首先，电容功率和容量的选取是系统构建和功率、容量等级确定的重要依据，但由于其影响因素多样复杂，在确定时应以工程实测数据为主进行设计；其二，我们在进行收益计算时认为列车的工作时间为一天 24 小时，但在列车的实际运行当中并非如此，而是有一个运行的“空窗期”，因此我们设定空窗期为 9 小时，引入空窗修正系数为 0.625，两个方案修正后的净利益如表所示为-705.95625 万元和 234.46875 万元。

## 七、问题三 动态牵引负荷精确预测

### 7.1 基于滑动窗的负荷探测算法和动态牵引负荷数据库的建立

我们设计了一个负荷投切检测算法。该算法能初步确定是否发生了功率突变和突变开始和终止的时间，排除功率单纯稳态波动的可能。对功率序列取滑动窗，对于任一时刻处功率点 $P_j$ ，有滑动窗口功率序列 $S = \{P_{j-N} \dots P_j \dots P_{j+N}\}$ ，滑动窗口总长为 $2N + 1$ 。对 $S$ 计算方差 $S_{var}$ ， $S_{mean}$ 为窗口平均功率， $\alpha$ 为阈值控制系数，取值为 $[0,1]$ 。当窗口内发生功率突变时，有 $S_{var} \gg \alpha S_{mean}$ 。因此，通过计算滑动窗口功率的方差和均值，可以判断窗口内是否发生功率突变，通过不断滑动窗口，能找到功率突变的始点 $P_{start}$ 和终点 $P_{end}$ 。本文取 $\alpha = 5e4, N = 100$ 。最终可从附件三给出的数据中提取出共 45 个功率突变波形。<sup>[18]</sup>

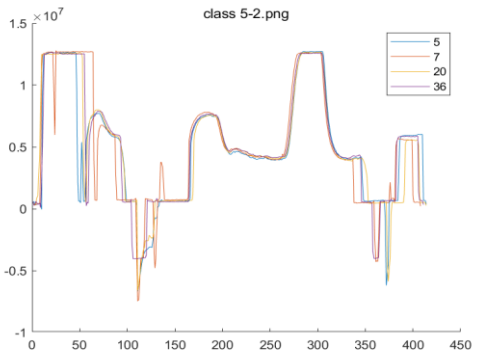
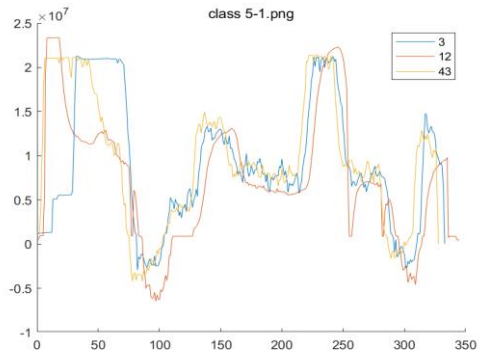
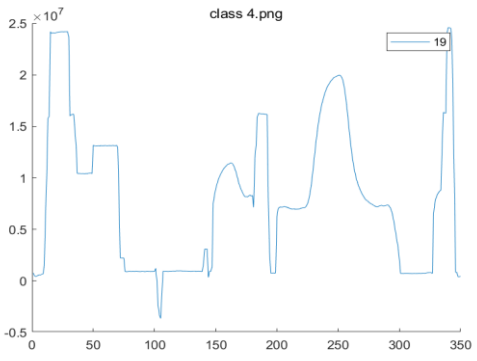
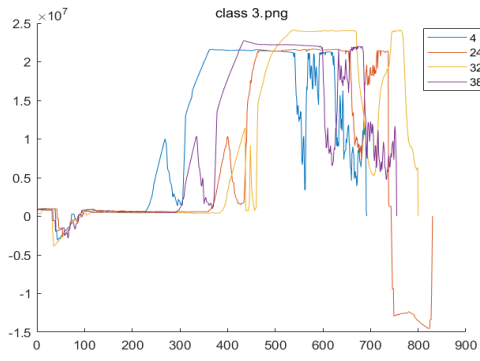
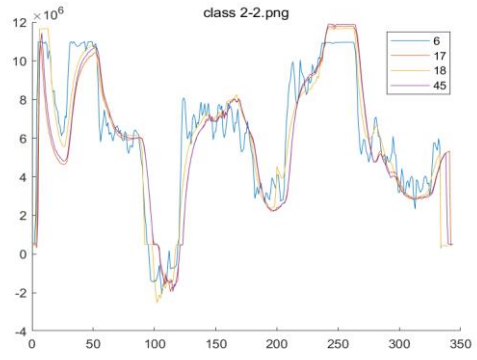
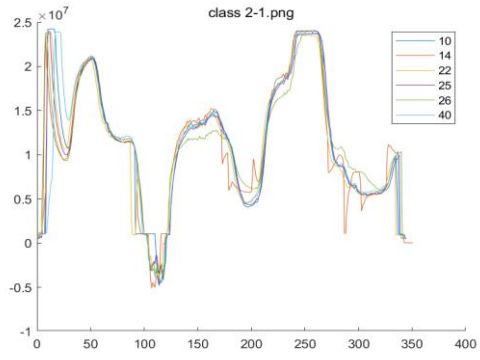
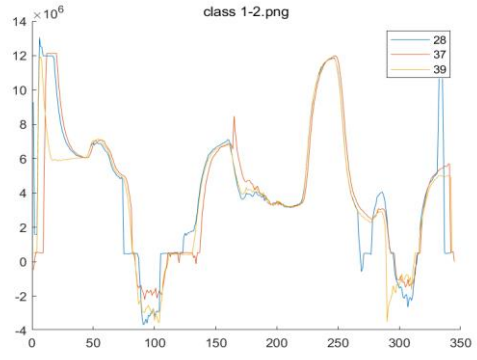
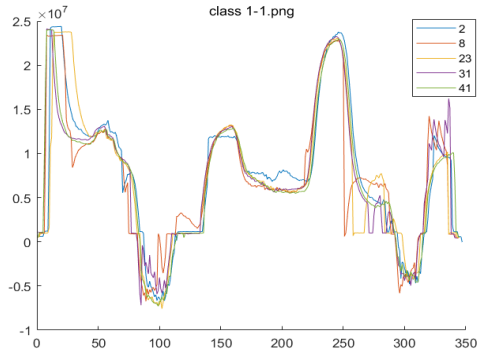
采用计算差值均方根RMS的方法可以判断两条波形的相似程度，计算公式如下：

$$RMS_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (P_i(t) - P_j(t))^2}{n}} \quad (15)$$

$$n = T_{end} - T_{start} \quad (16)$$

其中 $T_{start}$ 为波形的起点时刻， $T_{end}$ 为波形的终点时刻， $n$ 为时长， $P_i(t)$ 和 $P_j(t)$ 分别为第 $i$ 号和第 $j$ 号波形的实时牵引负荷功率。

通过对各个波形特征的提取和判别，计算两者之间的差均方根，可将这 45 个波形聚合成 8 个大类，又根据功率峰值的不一致，将其中四个大类一分为二。下图所示为基于上文所述负荷检测算法提取的十二个运行过程的动态牵引负荷特性数据集合，即为动态牵引负荷数据库。<sup>[19]</sup>



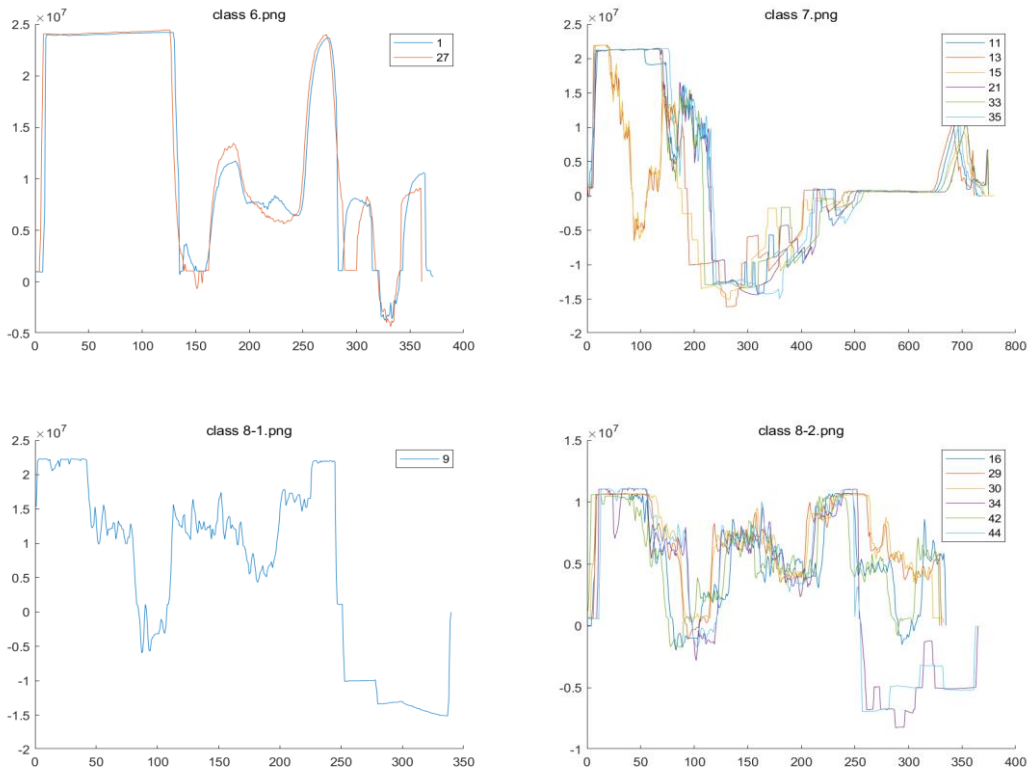


图 7-3 动态牵引负荷数据库

## 7.2 相关性分析实现动态牵引负荷的分类和标识

从问题表述可以知道，动态牵引负荷需求和运行过程是否停靠、编组数量、运行方向与车型不同这几个因素强相关。除此之外，以上提到的几个要素相同的动车组，动态功率需求趋势相同，电度消耗和返送相近，表现在功率波形曲线上，能够较好重合的两条波形所代表的动车组列车车次各项主要控制因素都相同。对于其他因素相同的动车组，16编组动车组额定功率为8编组动车组额定功率的2倍，表现在图上即为存在波形走向相同的两组曲线，其波动幅值正好相差1倍，这两者属于同一种大分类中的不同小类。图中功率曲线出现负值的时刻，可以确认动车组正处于制动状态，正在向电网回馈电量。可以从波形图中得到一些较为直观明显的特征，与现实情况进行对照，就能找到波形特点和行车状况直接的相关性。

通常，为充分利用能量节约成本，车站站台往往设计为车站地势高，进出站的轨道成一坡度下降的形式，如图。这样的好处是，动车进站时，不需要降低过多车速，随着车辆爬坡进站，动能转化为重力势能储存起来。而当车辆出站时，属于下坡出站，储存的重力势能转化为动能，车辆只需要更少的额外能量就能加速到需要的速度。



图 7-2 车站轨道设计示意图

因此上下行对车辆牵引功率需求的不同是很明显的。：1、2、4三类在负荷投切后，功率迅速突变到额定功率，在很短的时间内功率又快速回落，此后有功功率呈现波动态势，有数次出现了负值的波谷。3号类别在起始的时候出现了一个回馈的小波谷，在

保持空载功率一小段时间后，进入了波动的高负荷状态。动态牵引负荷在一开始达到最大，因为此时列车需要启动，经过水平轨道进入下坡。此后呈现波动态势，和现实中下坡相关对应，列车出站不需要额定功率全速出站，部分重力势能会转化为加速需要的动能，同时为了控制速度反而出现数次制动，这就是为什么波形出现了数个较低的达到负值的波谷。3号略有不同，认为没有停靠站台，依靠惯性滑出车站，唯一的波谷是由于控制速度的减速，当逐渐达到下坡终点时，为了让列车继续加速并保持车速，功率才提升到了额定功率。

5、6、7、8号类别，在投切后功率突变到额定功率范围，保持额定功率较长时间，在波形上形成一个平台，此后又迅速转入负功率。出现功率平台的原因是列车处于上坡阶段，为克服重力爬坡并保持车速，需要一段时间的额定功率输入。当列车即将或已经登上车站平台，则需要控制车速降低，列车多次制动，因而出现负功率回馈的波谷。特别地，对于7号类别，其在波形后段保持平稳之后突然出现了一个波峰，我们解释为动车组在此时调整车位，以对齐站台，或者属于停靠在站台上，为了出站进行了一次加速。

所以，这八大类波形，和实际对应，分别属于上坡进站和下坡出站的各四类。由于车型有四种，所以和四类波形一一对应。除了以上讨论的几个因素之外，和动态负荷波形最相关的就是车的型号。附录3附表2中给出了4种车型，我们需要从这八大类波形中找到对应，通过查阅资料我们能了解这具体四种车型的额定功率：

表 7-2 车型与额定功率<sup>[20-23]</sup>

编号	车型	额定功率
1	CRH380D	9600kW
2	CRH2A	4800kW
3	CRH3C	8800kW
4	CRH380B	9200kW

综合考虑附表2中各种车况的出现频次，当该车况的出现频次较高时，对应样本波形的数量也较多。通过这样的对应关系，我们将波的类型和列车车况种类一一对应：

1类-车型3下行；2类-车型1下行；3类-车型2下行；4类-车型4下行；

5类-车型3上行；6类-车型4上行；7类-车型2上行；8类-车型1上行；

### 7.3 线性回归构建负荷模型库

对于同类型的波形，其趋势相近，可以采取线性回归的方法，去除实测数据中由于如天气、测量、车况等小因素造成的误差和波动，得出动态牵引负荷的典型有功功率序列。

$$P(t) = P_0(t) + \varepsilon \quad (17)$$

其中， $P(t)$ 为动态牵引负荷， $t$ 为时间， $\varepsilon$ 为服从一定概率分布的随机变量负荷， $P_0(t)$ 为需要计算的典型有功功率序列，其计算方法如下：

$$P_0(t) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m p_i(t) \quad (18)$$

$p_i(t)$ 为运行过程 $i$ 的有功功率序列， $m$ 为过程数量，即为采取该分类中所有波形的平均值作为基本的典型有功功率序列。随机变量负荷 $\varepsilon$ 为动态牵引负荷和典型有功序列的残差，使用正态分布函数对残差进行拟合，其概率密度函数为：

$$f(x) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\delta^2}\right] \quad (19)$$

其中 $\mu$ ， $\delta$ 为残差的均值和标准差，拟合结果采用拟合优度 $R^2$ 来评估

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^L (y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^L (y_i - y_m)^2} \quad (20)$$

其中RSS为残差二次方和，TSS为总离差二次方和， $y_i$ 为平均值， $f_i$ 为拟合值，L为实际值的长度， $y_m$ 为实际值的平均值。 $R^2$ 的结果越接近1，则拟合程度越好，反之则拟合程度越差。由于相同大类中波形除幅值为2倍关系外，走势均没有大的差别，在分析时按同一大聚类分析，可以得到如下图所示典型有功序列的波形以及残差的分析与正态分布拟合。

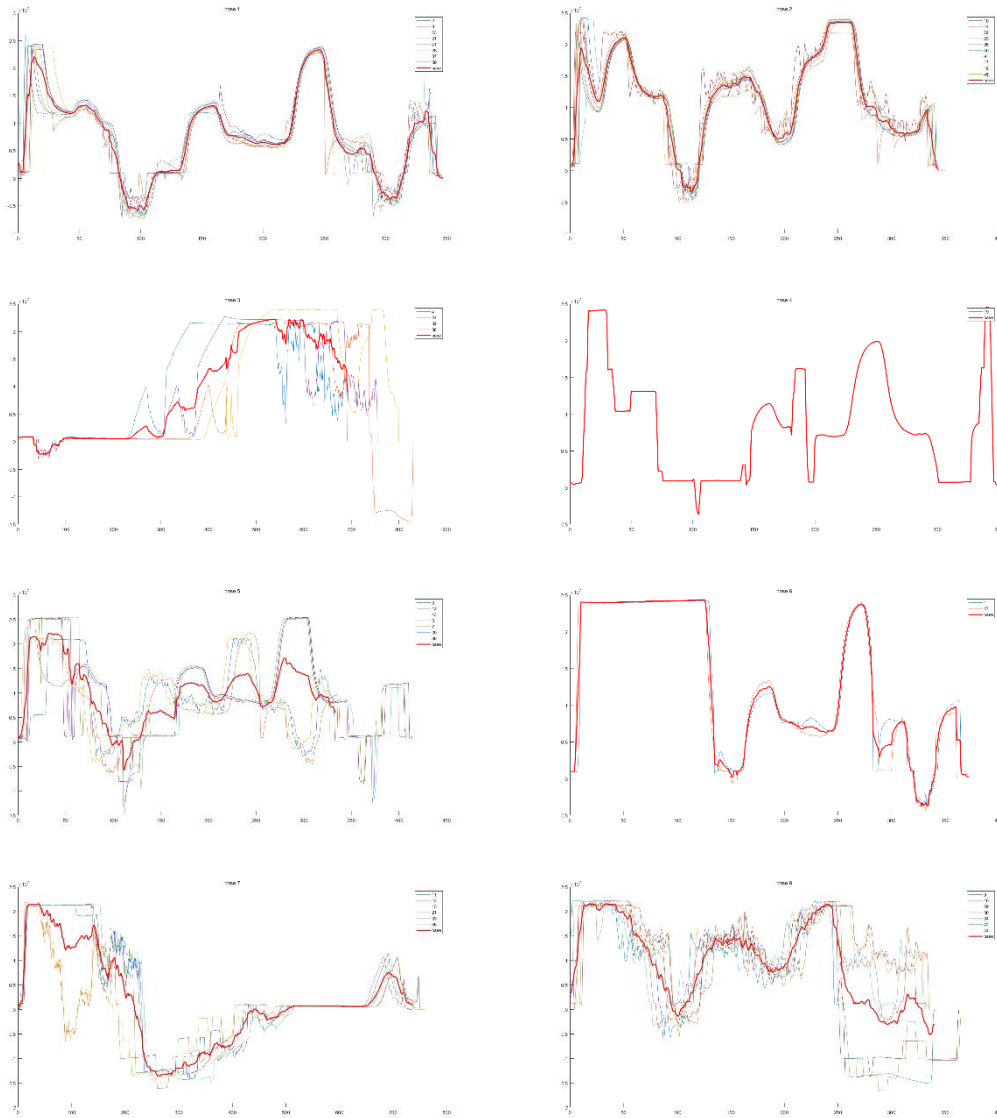
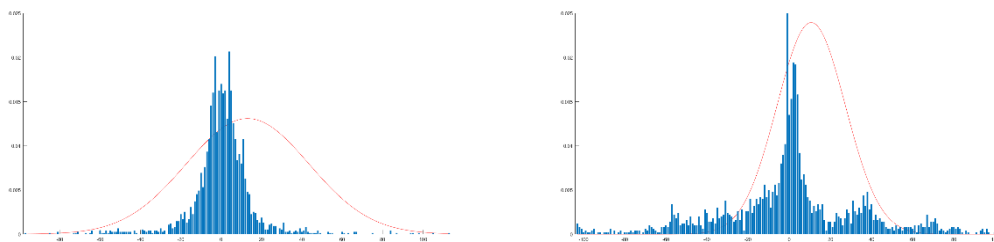


图 7-3 典型有功序列的波形



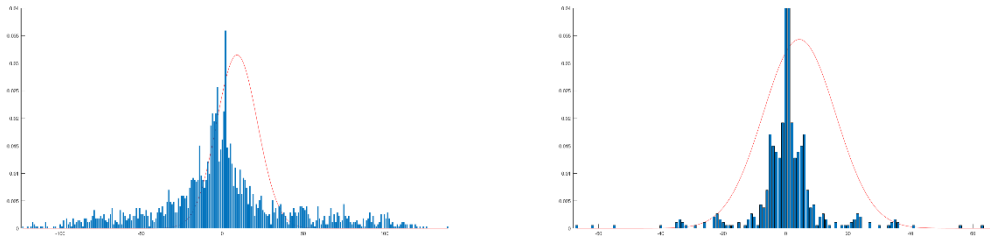


图 7-4 残差分析与正态分布拟合

#### 7.4 基于列车时刻表的动态牵引负荷模拟和电量预测

前面完成的模型已经建立了车辆运行工况和特征波形之间的对应关系。对于以时刻表为基础运行情况，要在对应的时间，按照对应的车型和运行情况，添加动态牵引负荷波形，这就是我们对于用电量的预测。全天24小时，变电站牵引负荷的变化，基本按照如图所示。本文附录展示了每一时刻的用电负荷情况，与题目附录三提供的文件记录方式相同，以1s为一个采样间隔，共计86400个数据。

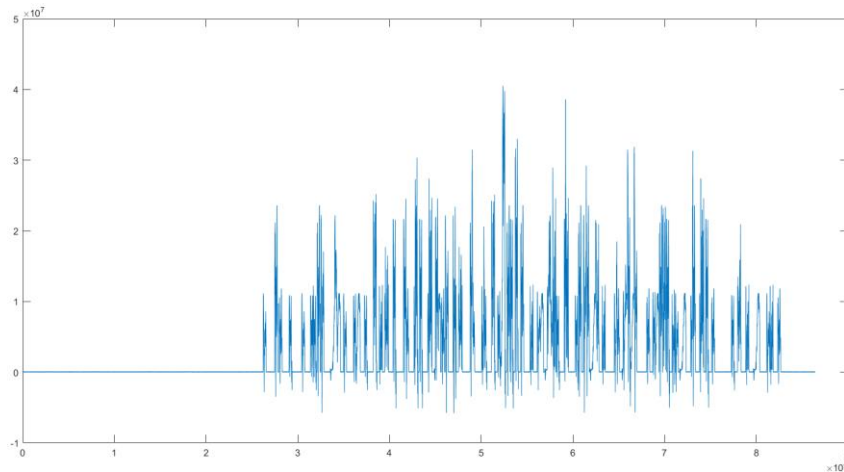


图 7-5 一天内用电量的预测

### 八、问题四 高铁牵引变电所-牵引负荷等值建模

高速动车组的接入和运行会对电网带来一系列,诸如负序、谐波等影响。为了能分析和计算高铁牵引变电所-牵引负荷的电压、电流及其相互耦合关系,有必要对其进行反映电气特性的等值建模。

#### 8.1 网侧建模

若要讨论整个牵引网络的建模,则最常用的是基于多导线传输线的链式网络模型<sup>[24]</sup>。在此模型中,牵引网用传输线参数来建模,且根据特定的导线有特定的建模方法,比如钢轨的电阻电抗可以用聂曼公式计算。牵引变压器根据其不同的接线方式会有不同的建模方法,之后我们会讨论牵引变压器的建模。当以牵引网为分析主体的时候,动车组等效为一电流源(因为,正如问题一中所分析的,动车组的接入主要会对电网的电流造成较大影响)。

但针对网侧的建模主要是聚焦于多个牵引变电所-牵引负荷之间的潮流计算,而不是强调动车组本身对电网的影响,因此本文不对网侧建模作过多展开。



## 8.2 变压器建模——负序

牵引变压器是动车组负荷与外部电网相连接的第一要道,它将外部电网与馈线关联起来、是两者电能传递交换的关口。如果将变压器及其后的馈线、动车组等效成一个集中单相非线性负荷,则可视在在三相电网的其中两相之间直接接了个单相负荷。但实际上,根据三相电网-变压器-单相馈线的接法不同,变压器及其两侧具有不同的精细建模方式。<sup>[25]</sup>本节以 V/V 接线为例,计算牵引变压器作用下网侧与馈线的电量关系,并推导出其对电网的负序引入。

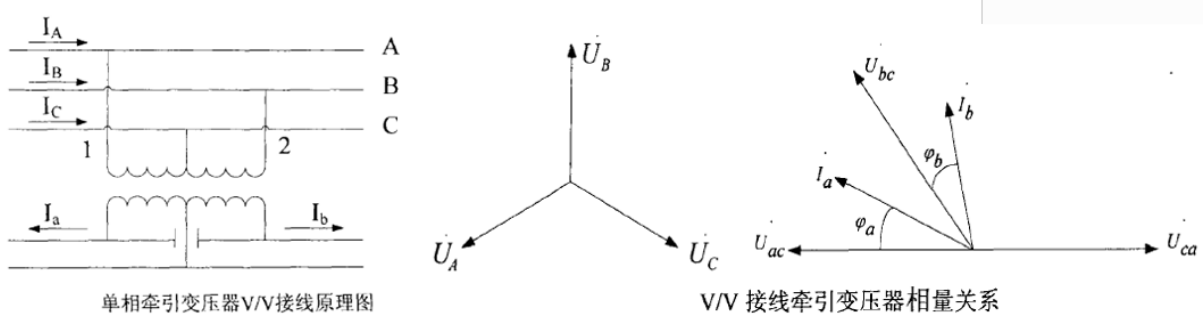


图 8-1 V/v 接线牵引变压器示意图

设变压器变比为  $K$ 。如图,画出相量图,以  $\dot{U}_{bc}$  为参考相量。

由于题目假定牵引变电所供电区间内不存在同时给两列及以上动车组供电的状况,故假设只有供电臂  $a$  接入动车,即  $I_a \neq 0, I_b = 0$ ,根据变压器接线方式,可得电网三相电流与馈线单相电流的关系。

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} I_a e^{j(60^\circ - \varphi_a)} \\ 0 \\ -I_a e^{j(60^\circ - \varphi_a)} \end{bmatrix} \quad (21)$$

可见,A 相电流与 C 相电流恰好等大反向,而 B 相电流为 0,这与本文问题一中画出的相量图相吻合。

根据对称分量法,可将电流的正负零序分量求出来,仅以 A 相为例,

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{A2} \\ \dot{I}_{A0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}K} \begin{bmatrix} I_a e^{j(90^\circ - \varphi_a)} \\ I_a e^{j(30^\circ - \varphi_a)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

可见,电流的正序分量和负序分量幅值相等、相角差  $60^\circ$ ,而零序电流近乎为 0,这与本文问题一中画出的序分量图相吻合。

由此可知,在单相负载和牵引变电所的作用下,负序分量大大增加、甚至与正序分量相当,对电网引入的负序不平衡度很大,但零序电流很小。

## 8.3 变换器建模——谐波

由变压器从电网取来的交流电,一般会经过电力电子变换器(交-直-交变换)再送给动车组,以利用电力电子技术改善电能质量。

本节以交-直变换的整流器为例,分析其等值电路和基本方程,进而可求得变换器两端电压及其谐波。<sup>[26]</sup>

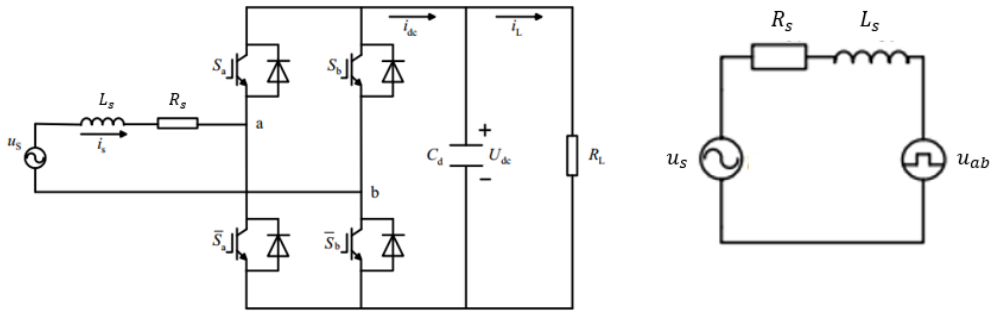


图 8-2 交流-直流变换器及其等值电路

交-直整流器的电路拓扑和等效简化电路如上图。其中,若直流母线电压 $U_{dc}$ 维持不变,则变换器端电压 $u_{ab}$ 是随开关波动的方波。控制开关管的交替通、断,就可以改变 $u_{ab}$ 的方波波形。不同的控制策略,会得到不同的 $u_{ab}$ 波形,以经典的双极性 SPWM 控制为例,其变换器端电压为

$$\begin{aligned}
 u_{ab}(t) = & U_{dc} \cdot M \cdot \cos(\omega_r t + \theta_r) \\
 & + \frac{4V_D}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} J_0\left(m \frac{\pi}{2} M\right) \sin\left(m \frac{\pi}{2}\right) \cos(m(\omega_c t + \theta_c)) \\
 & + \frac{4V_D}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{m} J_n\left(m \frac{\pi}{2} M\right) \sin\left(\frac{(m+n)\pi}{2}\right) \cos(m(\omega_c t + \theta_c) + n(\omega_r t + \theta_r)) \quad (23)
 \end{aligned}$$

其中, $M$ 是调制比, $\omega_r$ 是调制波基频, $\omega_c$ 是载波基频, $J_n$ 为  $n$  阶第一类贝塞尔函数。

第一项是基波分量,第二项是载波倍频谐波,第三项是边带谐波。

然后如上右图,变压器侧电压 $u_s$ 与变换器端电压 $u_{ab}$ 通过变压器和线路电阻 $R_s$ 、电感 $L_s$ 连接在一起,可列出回路电压方程

$$u_s = i_s R_s + L \frac{di_s}{dt} + u_{ab} \quad (24)$$

解微分方程即可解出电流 $i_s$ 。可见 $i_s$ 是受变换器端电压 $u_{ab}$ 影响的,故 $u_{ab}$ 所含的谐波也会给电流带来谐波,进而由上一小节可知,会经变压器给电网电流注入谐波。

由于变换器端电压的谐波与开关管控制策略以及调制波、载波的选择和调控有关,在参数未知的情况下难以计算,因此这里未给出计算结果与实测数据的比对

#### 8.4 负荷建模

电网电压经变压器、整流器送到直流母线,还需经逆变器变成质量较好的交流电压之后,给异步电机供电,如下图。因此,还需分析异步电机对馈线进而对电网的影响。[27]

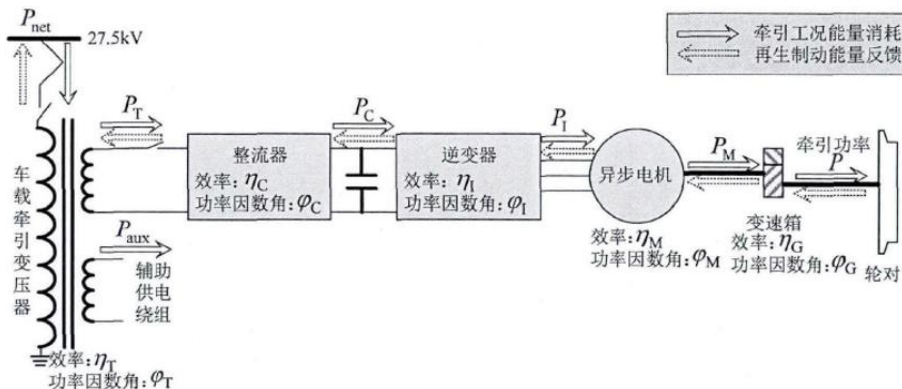


图 8-3 牵引供电系统的能量流动

对异步电动机的建模,需考虑其机械特性和电气特性。工程上比较常用的是异步电机的三阶机电暂态模型,其状态方程为

$$\begin{cases} T \frac{dE}{dt} = -E + CU \cos \delta \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_v - \frac{CU \sin \delta}{TE} \\ M \frac{d\omega_r}{dt} = -\frac{UE \sin \delta}{X} - T_m \end{cases} \quad (25)$$

其中, $E$  是电机的感应电势, $U$  是逆变器输出电压, $\delta$ 是两者的相角差。

此外,要考虑电机和电网的电能流动交换。画出相量图容易推得,电机和电网的传递功率计算式为

$$\begin{cases} P = -\frac{UE}{X} \sin \delta \\ Q = \frac{U(U - E \cos \delta)}{X} \end{cases} \quad (26)$$

方程中有许多待定参数,需要根据实测数据确定。此处仅给出了基本模型,其求解和比对有赖于进一步研究。

## 九、模型的评价、改进与推广

### 9.1 模型的优点

- 1.对牵引系统的各种工况进行了序量分解和频谱分解,并对功率曲线的各个变化阶段作出了细致的分析解释,揭示了牵引网空载、牵引、制动情况下各电量及电能质量的变化规律,对进一步分析具有指导意义。
- 2.从多角度深入考虑了再生制动能量的储能型方案与储能-能量回馈型复合方案的方案设计、系统拓扑,从电气原理层面进行了专业解读,从经济效益角度进行了准确的定量分析,针对两个不同的系统多方面特征实现了综合全面的比对。
- 3.序量分解、频谱分析、功率预测基于严密的理论逻辑和大量的实测数据,因此计算和分析结果具有可靠性强、研究价值高的优点。

### 9.2 模型的缺点

- 1.由于每种类型的动态负荷曲线数量不多,预测结果受噪声干扰较大。
- 2.只建立了大致的数学等值模型,而未能作出精准的参数确定和数据计算

### 9.3 模型的改进

- 1.对于所设计的再生制动方案,可搭建其电力电子装置电路并作仿真分析,以验证其在降低能耗方面的收益和性能,更进一步可对所设计方案的辅助外围电路作出考虑。
- 2.若能测得更多几天的有功功率需求曲线,则有助于提高动态负荷预测的准确度,且可以分出一部分作验证集以校验预测精确度。

## 十、参考文献

- [1]王斌,高仕斌,黄文,姜晓锋,邱忠才.高速列车再生制动工况时牵引供电系统谐波传输特性分析[J].电网技术,2014,38(02):489-494.
- [2]周婷.高速列车再生制动失效及解决方案研究[D].西南交通大学,2018.
- [3]王科.高速铁路牵引供电系统动态建模及电能质量分析[D].西南交通大学,2015.
- [4]周琨.交流机车再生制动能量利用方案研究[D].西南交通大学,2015.
- [5]李旭阳.面向节能的高速列车运行分析与优化研究[D].兰州交通大学,2020.
- [6]杨宏伟.基于混合储能的电气化铁路再生制动能量存储策略研究[D].兰州交通大学,2020.
- [7]胡海涛,陈俊宇,葛银波,黄文龙,刘陆洲,何正友.高速铁路再生制动能量储存与利用技术研究[J].中国电机工程学报,2020,40(01):246-256+391.
- [8]张欣.电气化铁路列车独立站点型再生制动能量回馈装置研究[D].西南交通大学,2017.
- [9]陈亚爱,石永帅,周京华,王赛.电力电子牵引变压器拓扑结构综述[J].电气传动,2018,48(10):89-96.
- [10]柳伟.电力机车牵引四象限变流器的研究与实现[D].湖北:华中科技大学,2018. DOI:10.7666/d.D01541791.
- [11]朱闻名.高速动车组网侧变流器研究[D].西南交通大学,2011.
- [12]田子思.基于任务剖面的高速动车组牵引变流器功率器件寿命评估[D].西南交通大学,2018.
- [13]王新彦,糜鹏,袁春元,苏世杰.电动车制动能量回馈下超级电容器的储能特性[J].机械设计与研究,2014,30(01):147-150.
- [14]张友鹏,杨宏伟,赵珊鹏.超级电容在高速铁路再生制动能量存储中的应用及控制[J].储能科学与技术,2019,8(06):1145-1150.
- [15]韩亚伟,姜挥,付强,郭春辰.超级电容器国内外应用现状研究[J].上海节能,2021(01):43-52.
- [18]魏波,胡海涛,王科,傅祺,何正友.基于实测数据和行车运行图的高铁牵引变电站负荷预测方法[J].电工技术学报,2020,35(01):179-188.
- [19]周明,宋旭帆,涂京,李庚银,栾开宁.基于非侵入式负荷监测的居民用电行为分析[J].电网技术,2018,42(10):3268-3276.
- [20]w\_ou.和谐号 CRH3 型电力动车组  
[EB/OL].<https://baike.baidu.com/item/%E5%92%8C%E8%B0%90%E5%8F%B7CRH3%E5%9E%8B%E7%94%B5%E5%8A%9B%E5%8A%A8%E8%BD%A6%E7%BB%84/9754567?fromtitle=CRH3&fromid=11001017>,2021-01-25.
- [21]B201005.和谐号 CRH2 型电力动车组  
[EB/OL].[https://baike.baidu.com/item/%E5%92%8C%E8%B0%90%E5%8F%B7CRH2%E5%9E%8B%E7%94%B5%E5%8A%9B%E5%8A%A8%E8%BD%A6%E7%BB%84/5626837?fromtitle=CRH2&fromid=8904837#7\\_1](https://baike.baidu.com/item/%E5%92%8C%E8%B0%90%E5%8F%B7CRH2%E5%9E%8B%E7%94%B5%E5%8A%9B%E5%8A%A8%E8%BD%A6%E7%BB%84/5626837?fromtitle=CRH2&fromid=8904837#7_1),2021-04-26.
- [22]thelegend2006.和谐号 CRH380B 型电力动车组  
[EB/OL].<https://baike.baidu.com/item/%E5%92%8C%E8%B0%90%E5%8F%B7CRH380B%E5%9E%8B%E7%94%B5%E5%8A%9B%E5%8A%A8%E8%BD%A6%E7%BB%84/8548413?fromtitle=crh380>

B&fromid=4163062, 2021-05-09.

[23]twy888. 高速列车

[EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item/%E9%AB%98%E9%80%9F%E5%88%97%E8%BD%A6/2410442?fr=aladdin>, 2021-01-27.

[24]王科. 高速铁路牵引供电系统动态建模及电能质量分析[D]. 西南交通大学, 2015.

[25]武松辉. 牵引系统中负序电流的计算与分析[D]. 南昌大学, 2007.

[26]崔玮辰, 刘明光, 郑景文. 高速铁路牵引供电系统间谐波的机理与特征研究[J/OL]. 铁道标准设计:1-9[2021-05-31]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202007140008>.

[27]吴双. 高速铁路牵引供电系统负荷建模[D]. 西南交通大学, 2013.

## 附录

### 附录 1

#### 问题一代码 1

```
%% 空载工况
% clear;clc; %清空变量缓存区、清屏
syms x; %定义系统变量，供后续进行算子的相关计算

% 定义三相电压相量
Phase_V_A = [1.8723e+05,5.4734];
Phase_V_B = [1.9065e+05,-114.97];
Phase_V_C = [1.8952e+05,124.75];

% 定义三相电流相量
Phase_I_A = [3.09,66.496];
Phase_I_B = [2.5637,0.73888];
Phase_I_C = [5.5236,-150.92];

% 将电压相量转变为欧拉公式的形式
V_a = Phase_V_A(1)*exp(deg2rad(Phase_V_A(2))*1i);
V_b = Phase_V_B(1)*exp(deg2rad(Phase_V_B(2))*1i);
V_c = Phase_V_C(1)*exp(deg2rad(Phase_V_C(2))*1i);

% 将电流相量转变为欧拉公式的形式
I_a = Phase_I_A(1)*exp(deg2rad(Phase_I_A(2))*1i);
I_b = Phase_I_B(1)*exp(deg2rad(Phase_I_B(2))*1i);
I_c = Phase_I_C(1)*exp(deg2rad(Phase_I_C(2))*1i);

% 电压电流向量图
tiledlayout(1,2);
ax1 = nexttile;
V_a_plot = compass(ax1,V_a,'k-.');hold on
V_a_plot.LineWidth = 2;
V_b_plot = compass(ax1,V_b,'k-.');hold on
V_b_plot.LineWidth = 2;
V_c_plot = compass(ax1,V_c,'k-.');hold on
V_c_plot.LineWidth = 2;

title(ax1,'电压向量图');
legend on
pax = gca;
pax.FontSize = 14;
```

```

ax2 = nexttile;
I_c_plot = compass(ax2,I_c,'k-.');hold on
I_c_plot.LineWidth = 2;
I_a_plot = compass(ax2,I_a,'k-.');hold on
I_a_plot.LineWidth = 2;
I_b_plot = compass(ax2,I_b,'k-.');hold on
I_b_plot.LineWidth = 2;

title(ax2,'电流向量图');
legend on
pax = gca;
pax.FontSize = 14;

% 计算算子
func_a = solve(x^3-1,x);
a = func_a(3); %算子取第二象限的解

% 计算序分量
U_1 = (V_a+a*V_b+a^2*V_c)/3; %计算电压正序分量
U_2 = (V_a+a^2*V_b+a*V_c)/3; %计算电压负序分量
U_0 = (V_a+V_b+V_c); %计算电压零序分量

I_1 = (I_a+a*I_b+a^2*I_c)/3; %计算电流正序分量
I_2 = (I_a+a^2*I_b+a*I_c)/3; %计算电流负序分量
I_0 = (I_a+I_b+I_c); %计算电流零序分量

% 序分量向量图
U_1_plot = compass(ax1,U_1,'r-');hold on
U_1_plot.LineWidth = 2.5;
U_2_plot = compass(ax1,U_2,'g-');hold on
U_2_plot.LineWidth = 2.5;
U_0_plot = compass(ax1,U_0,'b-');hold on
U_0_plot.LineWidth = 2.5;

I_1_plot = compass(ax2,I_1,'r-');hold on
I_1_plot.LineWidth = 2.5;
I_2_plot = compass(ax2,I_2,'g-');hold on
I_2_plot.LineWidth = 2.5;
I_0_plot = compass(ax2,I_0,'b-');hold on
I_0_plot.LineWidth = 2.5;

% 幅值提取
U_1 = round(double(norm(U_1)),3);
U_2 = round(double(norm(U_2)),3);

```

```

U_0 = round(double(norm(U_0)),3);

I_1 = round(double(norm(I_1)),3);
I_2 = round(double(norm(I_2)),3);
I_0 = round(double(norm(I_0)),3);

% 结果打印
fprintf('-----空载工况-----\n')
disp(['空载工况电压正序分量为: ',num2str(U_1),'V']);
disp(['空载工况电压负序分量为: ',num2str(U_2),'V']);
disp(['空载工况电压零序分量为: ',num2str(U_0),'V']);
fprintf('\n');
disp(['空载工况电流正序分量为: ',num2str(I_1),'A']);
disp(['空载工况电流负序分量为: ',num2str(I_2),'A']);
disp(['空载工况电流零序分量为: ',num2str(I_0),'A']);
fprintf('\n\n');

%% 牵引工况
clear; %清空变量缓存区
syms x; %定义系统变量，供后续进行算子的相关计算

% 定义三相电压相量
Phase_V_A = [1.8709e+05,-95.1];
Phase_V_B = [1.9055e+05,144.47];
Phase_V_C = [1.8945e+05,24.175];

% 定义三相电流相量
Phase_I_A = [37.742,-120.83];
Phase_I_B = [2.6426,-101.18];
Phase_I_C = [41.079,60.914];

% 将电压相量转变为欧拉公式的形式
V_a = Phase_V_A(1)*exp(deg2rad(Phase_V_A(2))*1i);
V_b = Phase_V_B(1)*exp(deg2rad(Phase_V_B(2))*1i);
V_c = Phase_V_C(1)*exp(deg2rad(Phase_V_C(2))*1i);

% 将电流相量转变为欧拉公式的形式
I_a = Phase_I_A(1)*exp(deg2rad(Phase_I_A(2))*1i);
I_b = Phase_I_B(1)*exp(deg2rad(Phase_I_B(2))*1i);
I_c = Phase_I_C(1)*exp(deg2rad(Phase_I_C(2))*1i);

% 计算算子
func_a = solve(x^3-1,x);
a = func_a(3); %算子取第二象限的解

```



```

% 电压电流向量图
tiledlayout(1,2);
ax1 = nexttile;
V_a_plot = compass(ax1,V_a,'k-.');hold on
V_a_plot.LineWidth = 2;
V_b_plot = compass(ax1,V_b,'k-.');hold on
V_b_plot.LineWidth = 2;
V_c_plot = compass(ax1,V_c,'k-.');hold on
V_c_plot.LineWidth = 2;

title(ax1,'电压向量图');
legend on
pax = gca;
pax.FontSize = 14;

ax2 = nexttile;
I_c_plot = compass(ax2,I_c,'k-.');hold on
I_c_plot.LineWidth = 2;
I_a_plot = compass(ax2,I_a,'k-.');hold on
I_a_plot.LineWidth = 2;
I_b_plot = compass(ax2,I_b,'k-.');hold on
I_b_plot.LineWidth = 2;

title(ax2,'电流向量图');
legend on
pax = gca;
pax.FontSize = 14;

% 计算序分量
U_1 = (V_a+a*V_b+a^2*V_c)/3; %计算电压正序分量
U_2 = (V_a+a^2*V_b+a*V_c)/3; %计算电压负序分量
U_0 = (V_a+V_b+V_c); %计算电压零序分量

I_1 = (I_a+a*I_b+a^2*I_c)/3; %计算电流正序分量
I_2 = (I_a+a^2*I_b+a*I_c)/3; %计算电流负序分量
I_0 = (I_a+I_b+I_c); %计算电流零序分量

% 序分量向量图
U_1_plot = compass(ax1,U_1,'r-');hold on
U_1_plot.LineWidth = 2.5;
U_2_plot = compass(ax1,U_2,'g-');hold on
U_2_plot.LineWidth = 2.5;
U_0_plot = compass(ax1,U_0,'b-');hold on

```

```

U_0_plot.LineWidth = 2.5;

I_1_plot = compass(ax2,I_1,'r-');hold on
I_1_plot.LineWidth = 2.5;
I_2_plot = compass(ax2,I_2,'g-');hold on
I_2_plot.LineWidth = 2.5;
I_0_plot = compass(ax2,I_0,'b-');hold on
I_0_plot.LineWidth = 2.5;

% 幅值提取
U_1 = round(double(norm(U_1)),3);
U_2 = round(double(norm(U_2)),3);
U_0 = round(double(norm(U_0)),3);

I_1 = round(double(norm(I_1)),3);
I_2 = round(double(norm(I_2)),3);
I_0 = round(double(norm(I_0)),3);

% 结果打印
fprintf('-----牵引工况-----\n')
disp(['牵引工况电压正序分量为: ',num2str(U_1),'V']);
disp(['牵引工况电压负序分量为: ',num2str(U_2),'V']);
disp(['牵引工况电压零序分量为: ',num2str(U_0),'V']);
fprintf('\n');
disp(['牵引工况电流正序分量为: ',num2str(I_1),'A']);
disp(['牵引工况电流负序分量为: ',num2str(I_2),'A']);
disp(['牵引工况电流零序分量为: ',num2str(I_0),'A']);
fprintf('\n\n');

%% 制动工况
clear;%清空变量缓存区
syms x; %定义系统变量，供后续进行算子的相关计算

% 定义三相电压相量
Phase_V_A = [1.8777e+05,116.87];
Phase_V_B = [1.9075e+05,-3.7225];
Phase_V_C = [1.8948e+05,-123.83];

% 定义三相电流相量
Phase_I_A = [36.763,-83.201];
Phase_I_B = [2.583,112.72];
Phase_I_C = [33.399,95.879];

% 将电压相量转变为欧拉公式的形式

```

```

V_a = Phase_V_A(1)*exp(deg2rad(Phase_V_A(2))*1i);
V_b = Phase_V_B(1)*exp(deg2rad(Phase_V_B(2))*1i);
V_c = Phase_V_C(1)*exp(deg2rad(Phase_V_C(2))*1i);

% 将电流相量转变为欧拉公式的形式
I_a = Phase_I_A(1)*exp(deg2rad(Phase_I_A(2))*1i);
I_b = Phase_I_B(1)*exp(deg2rad(Phase_I_B(2))*1i);
I_c = Phase_I_C(1)*exp(deg2rad(Phase_I_C(2))*1i);

% 计算算子
func_a = solve(x^3-1,x);
a = func_a(3); %算子取第二象限的解

% 电压电流向量图
tiledlayout(1,2);
ax1 = nexttile;
V_a_plot = compass(ax1,V_a,'k-.');hold on
V_a_plot.LineWidth = 2;
V_b_plot = compass(ax1,V_b,'k-.');hold on
V_b_plot.LineWidth = 2;
V_c_plot = compass(ax1,V_c,'k-.');hold on
V_c_plot.LineWidth = 2;

title(ax1,'电压向量图');
legend on
pax = gca;
pax.FontSize = 14;

ax2 = nexttile;
I_c_plot = compass(ax2,I_c,'k-.');hold on
I_c_plot.LineWidth = 2;
I_a_plot = compass(ax2,I_a,'k-.');hold on
I_a_plot.LineWidth = 2;
I_b_plot = compass(ax2,I_b,'k-.');hold on
I_b_plot.LineWidth = 2;

title(ax2,'电流向量图');
legend on
pax = gca;
pax.FontSize = 14;

% 计算序分量
U_1 = (V_a+a*V_b+a^2*V_c)/3; %计算电压正序分量
U_2 = (V_a+a^2*V_b+a*V_c)/3; %计算电压负序分量

```

```

U_0 = (V_a+V_b+V_c); %计算电压零序分量

I_1 = (I_a+a*I_b+a^2*I_c)/3; %计算电流正序分量
I_2 = (I_a+a^2*I_b+a*I_c)/3; %计算电流负序分量
I_0 = (I_a+I_b+I_c); %计算电流零序分量

% 序分量向量图
U_1_plot = compass(ax1,U_1,'r-');hold on
U_1_plot.LineWidth = 2.5;
U_2_plot = compass(ax1,U_2,'g-');hold on
U_2_plot.LineWidth = 2.5;
U_0_plot = compass(ax1,U_0,'b-');hold on
U_0_plot.LineWidth = 2.5;

I_1_plot = compass(ax2,I_1,'r-');hold on
I_1_plot.LineWidth = 2.5;
I_2_plot = compass(ax2,I_2,'g-');hold on
I_2_plot.LineWidth = 2.5;
I_0_plot = compass(ax2,I_0,'b-');hold on
I_0_plot.LineWidth = 2.5;

% 幅值提取
U_1 = round(double(norm(U_1)),3);
U_2 = round(double(norm(U_2)),3);
U_0 = round(double(norm(U_0)),3);

I_1 = round(double(norm(I_1)),3);
I_2 = round(double(norm(I_2)),3);
I_0 = round(double(norm(I_0)),3);

% 结果打印
fprintf('-----制动工况-----\n')
disp(['制动工况电压正序分量为: ',num2str(U_1),'V']);
disp(['制动工况电压负序分量为: ',num2str(U_2),'V']);
disp(['制动工况电压零序分量为: ',num2str(U_0),'V']);
fprintf('\n');
disp(['制动工况电流正序分量为: ',num2str(I_1),'A']);
disp(['制动工况电流负序分量为: ',num2str(I_2),'A']);
disp(['制动工况电流零序分量为: ',num2str(I_0),'A']);
fprintf('\n\n');

```

## 附录 2

### 问题一代码 2

```
Fs = 20e3; %采样频率
N = 4000; %DFT 点数。这里取跟 Signal 一样多的点数即可。
F = Fs/N * ([1:N/2] -1); %实际频率 频率步长为 5

% 计算算子
% syms x; %定义系统变量，供后续进行算子的相关计算
% func_a = solve(x^3-1,x);
% a = func_a(3); %算子取第二象限的解
a = 1*exp(2*pi/3 * 1i)

range = 1:500:20000000
M_3_rec = range;
I_1_rec = range;
I_2_rec = range;
I_0_rec = range;
P_rec = range;
index = 0;
for i = range
    index = index+1;

    Signal = Ia(i:i+3999);
    Y_FFT = fft(Signal,N);
    M_Y = abs(Y_FFT)/(N/2); %幅值。注意 M_Y(1)是直流分量。
    P_Y = angle(Y_FFT)*180/pi; %相位
    M_3_A = M_Y(31);
    Phase_I_A = [M_Y(11),P_Y(11)];

    Signal = Ib(i:i+3999);
    Y_FFT = fft(Signal,N);
    M_Y = abs(Y_FFT)/(N/2); %幅值。注意 M_Y(1)是直流分量。
    P_Y = angle(Y_FFT)*180/pi; %相位
    M_3_B = M_Y(31);
    Phase_I_B = [M_Y(11),P_Y(11)];

    Signal = Ic(i:i+3999);
    Y_FFT = fft(Signal,N);
    M_Y = abs(Y_FFT)/(N/2); %幅值。注意 M_Y(1)是直流分量。
    P_Y = angle(Y_FFT)*180/pi; %相位
    M_3_C = M_Y(31);
    Phase_I_C = [M_Y(11),P_Y(11)];

    M_3_rec(index) = sqrt(M_3_A^2 + M_3_B^2 + M_3_C^2);
```

```

%%计算序分量
% 定义三相电流相量
% 将电流相量转变为欧拉公式的形式
I_a = Phase_I_A(1)*exp(deg2rad(Phase_I_A(2))*1i);
I_b = Phase_I_B(1)*exp(deg2rad(Phase_I_B(2))*1i);
I_c = Phase_I_C(1)*exp(deg2rad(Phase_I_C(2))*1i);

% 计算序分量
I_1 = (I_a+a*I_b+a^2*I_c)/3; %计算电流正序分量
I_2 = (I_a+a^2*I_b+a*I_c)/3; %计算电流负序分量
I_0 = (I_a+I_b+I_c); %计算电流零序分量

%序分量幅值
I_1_rec(index) = abs(I_1);
I_2_rec(index) = abs(I_2);
I_0_rec(index) = abs(I_0);
P_rec(index) = Va(i)*Ia(i) + Vb(i)*Ib(i) + Vc(i)*Ic(i);

end
plot(M_3_rec)
title("三次谐波")
plot(I_1_rec)
title("正序电流")
plot(I_2_rec)
title("负序电流")
plot(I_0_rec)
title("零序电流")
plot(P_rec)
title("功率")

```

### 附录 3

#### 问题三代码 1

```

%画总图
% %index=zero
% n=1;
% for i=1:86400
%     if P_TPSN(i,1)>100000%|P_TPSN(i,1)<0
%         index(n,1)=i;
%         index(n,2)=P_TPSN(i,1);
%         n=n+1;

```

```

% end
% end
% P_TPSN_half=P_TPSN(34000:35500,1);
plot(P_TPSN);
hold on;
div=Pstart(1,:);
div2=Pend(1,:);
div3=[26220,29040,30420,31380,31680,32520,34020,34980,36060,37260,38280,3948
0,40380,41520,42780,43260,44160,45000,46080,47520,48960,50280,51180,51780,52
320,53160,53700,56100,57180,57480,58200,59040,60240,61140,62520,64500,65460,
65940,66660,68700,69780,70200,71160,72840,73800,74460,77280,78000,81120,2748
0,27960,32100,33540,33960,36120,38220,38880,39540,41760,42660,44280,44880,45
660,46920,47580,48780,50040,51120,51900,52800,53700,54300,55320,56100,56940,
57780,59160,60600,61440,61860,62460,63180,64740,65340,66060,68040,68700,6942
0,69840,70800,71640,73020,73920,75120,77940,78840,79680,81480,82320];
for i=1:49
    hold on;
    plot([div(1,i) div(1,i)],[-2E7 2E7],'r-');
    plot([div2(1,i) div2(1,i)],[-2E7 2E7],'g-');
%     plot([div3(1,i) div3(1,i)],[-2E7 2E7],'b-');
end

```

#### 附录 4

##### 问题三代码 2

```

%上下限法探测投切
%index=zero
n=1;
upper=2E6;
botton=-0.4E5;
for i=1:86400
    if (P_TPSN(i,1)>upper || P_TPSN(i,1)<botton)&&(P_TPSN(i-
1,1)>upper || P_TPSN(i-
1,1)<botton)&&(P_TPSN(i+1,1)>upper || P_TPSN(i+1,1)<botton)
        index(n,1)=i;
        index(n,2)=P_TPSN(i,1);
        n=n+1;
    end
end
% P_TPSN_half=P_TPSN(34000:35500,1);
n=1;
for k=2:15277

```

```

if index(k,1)-index(k-1,1)>5
    cut(n,1)=index(k,1);
    n=n+1;
end
end
% hold on
% plot([index(:,1) index(:,2)])
% end
    % plot([1 2],[2 3]);

```

## 附录 5

### 问题三代码 3

%每个波形生成图片并保存

```

cut=[26360,30425,31385,31474,32523,34026,34983,36063,37262,38282,39486,40382
,41526,42001,42782,43265,44166,45004,46084,47522,48962,51186,52324,53162,537
06,55504,56582,57302,58202,59046,60246,61142,62522,64506,65466,66666,68702,6
9784,71166,71262,72844,73803,74464,77286,78006,81125,82804];

```

%49 项

hold on

upper=2E6;

botton=-0.4E5;

num16=0;

for j=1:49

for i=cut(1,j):86400

if P\_TPSN(i,1)<upper&&P\_TPSN(i,1)>botton&&(i-cut(1,j)>20)

end\_cut=i;

break;

end

end

% for k=cut(1,j):end\_cut

% if P\_TPSN(k,1)>2.2E7

% num16=num16+1;

% break;

% end

% end

picname=[num2str(j) '.png'];

gcf=plot(P\_TPSN(cut(1,j):end\_cut));

saveas(gcf,picname);

% close all;

end



## 附录 6

## 问题三代码 4

```

load P_TPSN.mat
%滑动窗法求波形
N=100;%滑动窗单侧宽度
alpha=5e4;%阈值控制系数
judge=1;
Pstart=[0];
Pend=[0];
for i=N+1:86400-N
    S=zeros(2*N+1,1);
    for j=1:2*N+1
        S(j,1)=P_TPSN(i+j-N-1,1);%框定滑动窗
    end
    Smean=sum(S(:,1))/(2*N+1);%滑动窗内元素平均值
    Svar=sum((S(:,1)-Smean).^2)/(length(S)-1);%滑动窗内元素方差
    aSmean=alpha*Smean;%乘以系数
    if aSmean<Svar&&judge==1%判断突变的起点
        Pstart=[Pstart i+N];%突变起点
        judge=0;%接下来突变起点判断暂时禁用
    end
    if judge==0&&aSmean>Svar&&Smean<5E4%突变终点的判断&&(i-
Pstart(1,length(Pstart))>2*N+1)
        Pend=[Pend i-N];%突变终点
        judge=1;
    end
end
end
% 4.022/4.038-4.402/4.416
for i=1:length(Pstart)
    if Pstart(i+1)>40380
        Pstart=[Pstart(1,1:i) 40380 Pstart(1,i+1:length(Pstart))];
        break;
    end
end
for i=1:length(Pend)
    if Pend(i+1)>40220
        Pend=[Pend(1,1:i) 40220 Pend(1,i+1:length(Pend))];
        break;
    end
end
end
for i=1:length(Pstart)
    if Pstart(i+1)>44160
        Pstart=[Pstart(1,1:i) 44160 Pstart(1,i+1:length(Pstart))];

```

```

        break;
    end
end
for i=1:length(Pend)
    if Pend(i+1)>44020
        Pend=[Pend(1,1:i) 44020 Pend(1,i+1:length(Pend))];
        break;
    end
end
%4.313/4.326
for i=1:length(Pstart)
    if Pstart(i+1)>43260
        Pstart=[Pstart(1,1:i) 43260 Pstart(1,i+1:length(Pstart))];
        break;
    end
end
for i=1:length(Pend)
    if Pend(i+1)>43130
        Pend=[Pend(1,1:i) 43130 Pend(1,i+1:length(Pend))];
        break;
    end
end
Pstart(:,1)=[];
Pend(:,1)=[];

```

## 附录 7

### 问题三代码 5

%49 项，画波形重叠图

```

hold on
num16=0;
for j=[5,7,20,36]
%   [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,
%   11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,
%   21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,
%   31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,
%   41,42,43,44,45]
%8-2[16,29,30,34,42,44]
%6[1,27]
%7[11,13,15,21,33,35]
%5-2[5,7,20,36]
%2-1[10,14,22,25,26,40]
%8-1[9]

```

```

%1-2[28,37,39]
%1-1[2,8,23,31,41]
%3[4,24,32,38]
%5-1[3,12,43]
%4[19]
%2-2[6,17,18,45]

% 1 [2,8,23,31,41,28,37,39]
% 2 [10,14,22,25,26,40,6,17,18,45]
% 3 [4,24,32,38]
% 4 [19]
% 5 [3,12,43,5,7,20,36]
% 6 [1,27]
% 7 [11,13,15,21,33,35]
% 8 [9,16,29,30,34,42,44]
%     picname=[num2str(j) '.png'];
% if j==16||j==29||j==30||j==34||j==42||j==44||j==5||j==7||j==20||j==36||j==
28||j==37||j==39||j==6||j==17||j==18||j==45
%    (gcf=plot(2*P_TPSN(Pstart(1,j):Pend(1,j)),'DisplayName',num2str(j));
% else
%    (gcf=plot(P_TPSN(Pstart(1,j):Pend(1,j)),'DisplayName',num2str(j));
% end
%     picname=['class 5-2', '.png'];
%     title(picname);
%     legend('Location','northeast');
%     saveas(gcf,picname);
%     close all;
end

```

## 附录 8

### 问题三代码 6

%求均方根

clean

```

Pstart=[26221,29041,30423,31384,32523,34025,34984,36062,37260,38280,39484,40
380,41520,42780,43260,44160,45003,46083,47522,48961,51180,52323,53160,53704,
55503,56580,57301,58200,59045,60244,61141,62522,64504,65464,66664,68701,6978
0,71164,72842,73802,74463,77284,78004,81124,82802];

```

```

Pend=[26592,29387,30755,32075,32936,34358,35391,36405,37599,38623,40220,4072
4,42242,43130,44020,44494,45345,46422,47871,49374,51929,52664,53503,54533,55
847,56922,57661,58541,59375,60576,61483,63321,65254,65828,67402,69111,70124,
71918,73184,74145,74807,77612,78331,81486,83145];

```

```

for i=1:45

```

```

    diff(i)=Pend-Pstart;
end
scale=min{diff(m),diff(n)};

tmp_rms=0;
res_rms=zeros(45,1);
for j=1:45
    for i=1:45
%       if -Pstart(1,j)+Pend(1,j)>-Pstart(1,i)+Pend(1,i)
        for ii=Pstart(1,j):Pend(1,j)
            for jj=Pstart(1,i):Pend(1,i)
                tmp_rms=tmp_rms+(P_TPSN(ii)-P_TPSN(jj)).^2;
%                 end
            end
        end
        res_rms(j,i)=sqrt(tmp_rms/(Pend(1,i)-Pstart(1,i)));
        tmp_rms=0;
    end
end
end

```

## 附录 9

### 问题三代码 7

```

%进行拟合和求残差,画图
load P_TPSN.mat
%选取需要求解的波形数量
Pstart=[26221,29041,30423,31384,32523,34025,34984,36062,37260,38280,39484,40
380,41520,42780,43260,44160,45003,46083,47522,48961,51180,52323,53160,53704,
55503,56580,57301,58200,59045,60244,61141,62522,64504,65464,66664,68701,6978
0,71164,72842,73802,74463,77284,78004,81124,82802];
Pend=[26592,29387,30755,32075,32936,34358,35391,36405,37599,38623,40220,4072
4,42242,43130,44020,44494,45345,46422,47871,49374,51929,52664,53503,54533,55
847,56922,57661,58541,59375,60576,61483,63321,65254,65828,67402,69111,70124,
71918,73184,74145,74807,77612,78331,81486,83145];
for i=1:45
    diff(i)=Pend(1,i)-Pstart(1,i);
end

%%
whatwechoose=[9,16,29,30,34,42,44];
for j=whatwechoose
if j==16||j==29||j==30||j==34||j==42||j==44||j==5||j==7||j==20||j==36||j==28
||j==37||j==39||j==6||j==17||j==18||j==45

```

```

    P_TPSN(Pstart(1,j):Pend(1,j))=2*P_TPSN(Pstart(1,j):Pend(1,j));
end
end

%%%

sum_tempcurve=0;
number=length(whatwechoose);
for j=whatwechoose
tempcurve=P_TPSN(Pstart(1,j):Pend(1,j));
tempcurve=tempcurve.';
if length(tempcurve)>length(sum_tempcurve)&&length(sum_tempcurve)>10
    tempcurve(length(sum_tempcurve)+1:length(tempcurve))=[];
    sum_tempcurve=tempcurve+sum_tempcurve;
else
    if sum_tempcurve==0
        sum_tempcurve=tempcurve+sum_tempcurve;
        continue
    end
    tempcurve(1,length(tempcurve):length(sum_tempcurve))=zeros;
    sum_tempcurve=tempcurve+sum_tempcurve;
end
end
ptempcurve=sum_tempcurve(1,:)/number;

%画平均图内容
%%%
hold on
for j=whatwechoose
gcf=plot(P_TPSN(Pstart(1,j):Pend(1,j)),'DisplayName',num2str(j));
legend('Location','northeast');
end
plot(ptempcurve,'r','DisplayName','base','LineWidth',2);
picname=['base 4'];
title(picname);
%%%
%
%自此为止，画出波形图
%下面是画残差图
upper=0;bott=0;
times=1.5E5;%比例缩放
for j=whatwechoose
tempcurve=P_TPSN(Pstart(1,j):Pend(1,j));
tempcurve=tempcurve.';

```

```

if length(tempcurve)>length(ptempcurve)&&length(ptempcurve)>10
    tempcurve(length(ptempcurve)+1:length(tempcurve))=[];
else
    tempcurve(length(tempcurve)+1:length(ptempcurve))=zeros;
end
diffcurve=ptempcurve-tempcurve;
diffcurve=ceil(diffcurve/times);
[upper,~]=max([upper,diffcurve]);
[bott,~]=min([bott,diffcurve]);
end
epsilon=zeros(1,upper-bott+1);
for j=whatwechoose
    tempcurve=P_TPSN(Pstart(1,j):Pend(1,j));
    tempcurve=tempcurve.';
    if length(tempcurve)>length(ptempcurve)&&length(ptempcurve)>10
        tempcurve(length(ptempcurve)+1:length(tempcurve))=[];
    else
        tempcurve(length(tempcurve)+1:length(ptempcurve))=zeros;
    end
    diffcurve=ptempcurve-tempcurve;
    diffcurve=ceil(diffcurve/times);
    for m=1:length(diffcurve)
        n=diffcurve(1,m);
        epsilon(1,-bott+n+1)=epsilon(1,-bott+n+1)+1;
    end
end
meanepsilon=0;
for i=1:upper-bott
    meanepsilon=meanepsilon+epsilon(1,i);
end
for i=1:upper-bott
    if epsilon(1,i)>0.05*meanepsilon
        epsilon(1,i)=(0.5*epsilon(1,i));
    end
end
end

hold on
x=bott:1:upper;
%%
[mu,sigma]=normfit(epsilon);
norm=normpdf(x,mu,sigma);
gcf=plot(x,norm,'r-');
gcf2=bar(x,epsilon/times*80);

```

```

% axis([-50 50 0 0.1])
R2=epsilon(1,i)-meanepsilon;
    % % [R2,~,~,~]=REGRESS

```

## 附录 10

### 问题三代码 8

```

%根据时刻表作预测
load condition.mat
load pcurve_1.mat
load pcurve_2.mat
load pcurve_3.mat
load pcurve_4.mat
load pcurve_5.mat
load pcurve_6.mat
load pcurve_7.mat
load pcurve_8.mat
PreP_TPSN=zeros(86400,1);
for i=1:99
    chexing=condition(i,1);
    bianzu=condition(i,2);
    tingkao=condition(i,3);
    shangxiaxing=condition(i,4);
    shijian=condition(i,5);
    pcurve=0;
    if shangxiaxing==1%1 为上行, 0 为下行
        switch chexing
            case 1
                pcurve=pcurve_8;
            case 2
                pcurve=pcurve_7;
            case 3
                pcurve=pcurve_5;
            case 4
                pcurve=pcurve_6;
        end
    else
        switch chexing
            case 1
                pcurve=pcurve_2;
            case 2
                pcurve=pcurve_3;
            case 3

```

```

        pcurve=pcurve_1;
    case 4
        pcurve=pcurve_4;
    end
end
if bianzu==8%编组 8 为一半, 16 为 1 倍
    pcurve=0.5*pcurve;
end
for j=1:length(pcurve)
    PreP_TPSN(shijian+j-1,1)=PreP_TPSN(shijian+j-1,1)+pcurve(j);
end
end
for i=1:length(PreP_TPSN)
    r=-3E4+(3E4+1E5)*rand(1);
    PreP_TPSN(i,1)=PreP_TPSN(i,1)+r;
end

```

附录 11						
问题三 d 结果						
单位/W						
38715.82	88759.97	51722.57	95728.79	-6412.17	-17959.3	51727.84
35869.56	-8709.14	99416.42	8889.515	74480.79	43967.47	73672.09
-5933.08	-159.471	93717.12	-18635.5	8197.834	-5360.76	40129.82
-13070.9	43021.42	33579.55	87304.69	59784.58	81642.46	80274.8
-15007	-12133.9	58766.13	7995.392	38606.3	73533.99	5942.699
64233.75	66016.61	-13693.6	2110.069	5505.169	88773.05	31515.32
35098.51	38824.82	71044.28	11477.44	75554.26	-20999.3	30227.74
71132.69	-29809.9	10531.6	-18295.4	63268.16	-18428.6	41649.99
48525.06	14494.76	28371.56	-15771.4	18396.65	7601.705	33086.99
43202.87	35133.82	77735.35	12874.34	61727.11	81276.02	75385.69
2004.631	70881.27	75424.26	65203.08	59931.66	32319.07	93833.04
78687.67	45782.73	11202.38	60513.46	20103.92	52412.5	-11986.1
44525.79	-10315.1	-15827.4	-9606.35	37255.03	49372.38	95312.6
-27804.4	96243.71	-18209.8	70045.58	-24279.7	72478.89	51166.06
45634.68	57372.23	49116.08	62401.66	48312.42	84272.69	975.5681
-28313.1	-1136.78	49397.99	58648.26	41691.72	5184.844	85013.79
28591.11	-15311.6	-29663.1	-3388.22	73354.71	-22649.5	43339.65
13090.19	-15967.5	80795.11	59806.15	73559.78	9271.578	18284.35
9544.066	57167.62	22290.33	19590.74	65844.74	48024.88	-9850.76
21989.28	88068.74	5081.222	66398.65	68218.95	27310.73	51385.24
93222.55	40110.9	4756.263	19585.97	-17025.3	58134.55	8931.308
40158.35	85080.02	25677.69	-8824.88	33841.9	3097.877	40185.38



6208.961	15708.31	1866.397	51453.14	36317.58	2339.63	-221.08
75411.99	-3519.59	22217.09	21979.58	21988.88	-8395.9	1504.575
-18625	-23515.6	90929.36	-15114.3	24038.95	17410.38	52748.07
52036.05	-24323.6	75462.46	15478.2	71923.01	34617.29	12044.93
12338.3	98601.34	-26340.5	61356.12	41211.79	-27997.1	66130.56
93918.16	62278.69	-27532.8	15210.05	35244.89	88929.79	6149.934
48064.81	46157.28	47015.68	70981.74	66407.31	17079.09	16731.76
33701.77	7072.822	51027.47	49285.82	2235.063	3143.54	49027.56
-15258.5	68445.9	17024.5	13039.84	59515.77	63337.88	38824.16
79263.87	5079.187	81853.94	15429.44	25165.13	78812.37	72590.37
49878.87	-6552.86	45438.97	77948.05	37547.49	48618.41	-2748.34
35802.75	6503.692	18685.06	334.1316	92486.02	42652.76	37231.54
95992.82	94714.75	96116.9	-1887.91	5357.463	29835.91	43466.36
95534.35	-3720.85	9889.464	-862.682	89646.81	31071.97	-16051.1
6633.124	42291.41	1358.737	38221.62	26477.91	59971.89	-29761.6
62935.73	-10360	-28202.2	28407.54	2347.686	37739.67	64869.69
-18730.4	84121.69	41746.11	-9573.47	69188.39	50393.18	55836.34
69020.75	92644.61	-3031.65	49616.11	34548.86	-27125.4	21916.41
67652.94	48376.92	-3057.13	25466.51	59133.9	28298.26	-8151.77
-14495.1	69100.39	-10410.4	18478.72	61369.93	91298.79	31278.69
-23679.6	36738.92	34148.58	92389.74	6377.378	97912.87	83228.24
51227.13	13096.14	-13230.6	4939.46	-1741.7	53709.61	78542.47
61650.84	-21392.6	27459.74	10991.81	65629.39	63001.36	99795.51
7634.326	-27667.7	21650.48	1045.428	84240.68	90982.07	-8043.43
1110.451	10071.79	48604.02	23044.91	85623.17	55126.28	90859.73
64911.84	-17997.3	64534.95	87814.52	65842.75	2182.217	44622.67
-9776.91	-14186.1	96826.43	-249.811	63823.57	13844.74	29056.74
33122.76	79845.6	36537.09	14368.69	58188.9	99831.43	79258.25
78585.49	-23972.7	22759.71	66561.8	47484.91	38203.46	24807.51
4762.181	41023.26	37887.99	778.6852	61518.31	-16997	-14876.9
60816.23	20895.32	58885.45	35608.56	-20682.8	93850.48	85213.7
-6242.08	50758.82	-17022.3	19756.81	-2667.64	-25907.8	-15659.2
-25494.1	46051.51	54545.65	11454.15	71098.19	-25373	-10337.5
4816.08	23816.23	13900.69	58759.68	-1051.56	71802.35	6586.82
25562.52	66267.29	58636.75	79833.82	6402.047	94756.47	62191.4
2683.512	70935.32	-2998.18	84677.17	91526.39	25930.99	13460.01
50232.12	70617.62	-2816.2	55359.81	27241.1	46855.34	37361.13
69820.52	77456.65	89189.57	12056.31	26427.7	19768.94	95688.65
34065.97	77937.88	80086.45	92303.43	37171.31	74849.2	38440.51
-27534.7	74975.12	45472.85	25378.49	67601.95	-18023.8	85252.6
-11703.2	-3594.18	71500.29	34076.96	-13831.6	10754.71	21006.24
-24501.7	27125.73	6318.763	-20750.4	77387.89	86546.08	-10511.8
30628.28	22248.9	97279.16	17831.35	2407.018	23587.69	38881.49
2033.909	-7208.72	27432.81	7130.298	8891.284	-17064.2	60370.91

54689.99	35726.31	97599.49	8749.387	81411.22	18038.3	93212.54
83233.32	55508.1	91899.66	64356.61	-20568.5	91830.7	-16578.1
10733.18	-28501.8	1040.015	19653.15	65177.31	4011.298	-23925.6
29247.17	86279.87	52312.24	-19063.5	48989.85	-16867.1	-29484.5
10367.28	-13206.9	67201.62	-28041	69388.7	99883.99	-26625.2
96922.09	-5717.52	27078.72	88743.71	82622.08	91987.81	43840.46
4940.541	-25805.1	-1450.07	22487.16	16277.83	9696.972	5280.092
-17854.3	-3450.92	95816.55	50673.93	60782.24	-21340.8	53648.83
-9294.3	99038.59	36925.29	85179.68	-947.553	87744.1	19914.69
39068.05	-25538.9	-17065.6	-20771.9	-27916.8	74487.98	50841.49
11745.17	68301.25	29442.35	51122.96	-14698	61691.13	-24206.9
5157.518	7429.7	51011.23	9370.647	46661.27	94766.1	30888.45
-10529.8	12507.19	98003.81	3095.715	84576.26	55030	32946.18
19905.53	41658.06	71179.56	92908.66	-24791.7	95741.26	30683.84
5391.519	42618.09	88237.84	70873.75	51881.12	82582.81	98188.11
-13239.9	-5051.77	59202.14	-23604.7	7857.18	39926.14	92064.52
44.92458	87343.31	5297.1	-2937.48	539.737	25402.78	68242.29
59732.55	47690.63	81679.25	2694.486	74357.77	84595.23	1588.399
40702.57	-12408.7	-8643.8	-24069.2	-3210.6	32778.93	57257.19
27286.2	19485.81	42084.9	25515.15	79140.93	-13122.8	46245.83
-1763.38	88787.17	13569.92	5518.367	-17042.1	35806.32	34827.54
54153.5	19739.43	41042.8	45201.98	74074.54	22352.14	60232.92
55537.4	74882.72	63276.05	99390.08	-332.748	41095.23	30563.94
-4576.99	-14499.2	71389.74	22102.41	54409.82	153.3583	73817.18
74311.08	84936.68	-26849.6	89685.96	-1590.03	8047.2	92899.78
50072.55	23734.66	89327.66	53963.23	37869.46	24957.21	38684.77
25769.81	-13523.1	21244.99	67316.28	53220.75	75777.66	-3221.89
39103.42	38024.02	93757.91	75262.01	-3330.15	908.5581	27460.03
77693.94	-3918.5	-29652.8	88706.74	-4241.01	-13117.8	66277.7
25586.46	56694.89	87920.16	1865.709	90410.16	75381.09	8293.308
81185.74	-4261.27	73844.98	36792.27	76430.84	53726.19	-20656.8
98789.5	65740.85	-25558.5	76604.43	89358.32	-25662.1	44021.88
-25890.2	21478.69	32961.05	49659.46	72894.3	35209.72	81979.18
88759.97	2120.526	-25834	38880.32	53058.48	76357.26	4273.41

只展示前 800 项结果，其余查看 PreP\_TPSN

附录 12												
每张图形对应波形序号												
每张图形对应波形序号												
对应 波形 序号	1-2	1-2	2-1	2-2	3	4	5-1	5-2	6	7	8-1	8-2
	2	28	10	6	4	19	3	5	1	11	9	16
	8	37	14	17	24		12	7	27	13		29
	23	39	22	18	32		43	20		15		30
	31		25	45	38			36		21		34
	41		26							33		42
			40							35		44