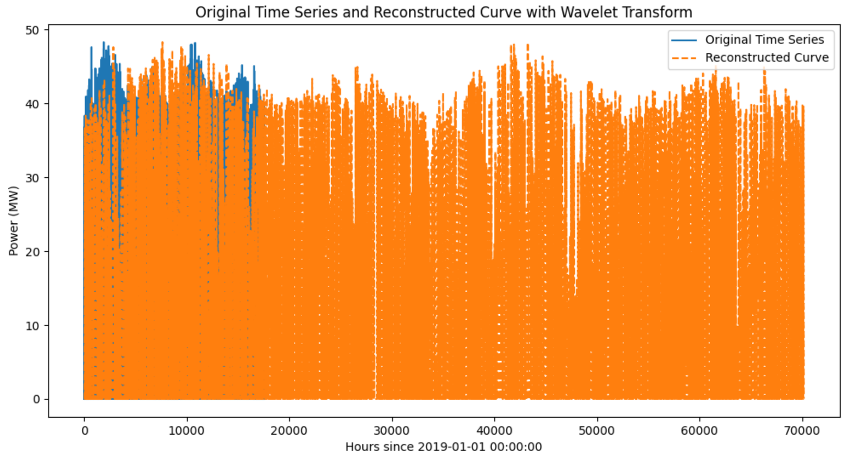

图 2.3　JSGF001 全年数据拟合结果

该拟合结果的局部图片如下：

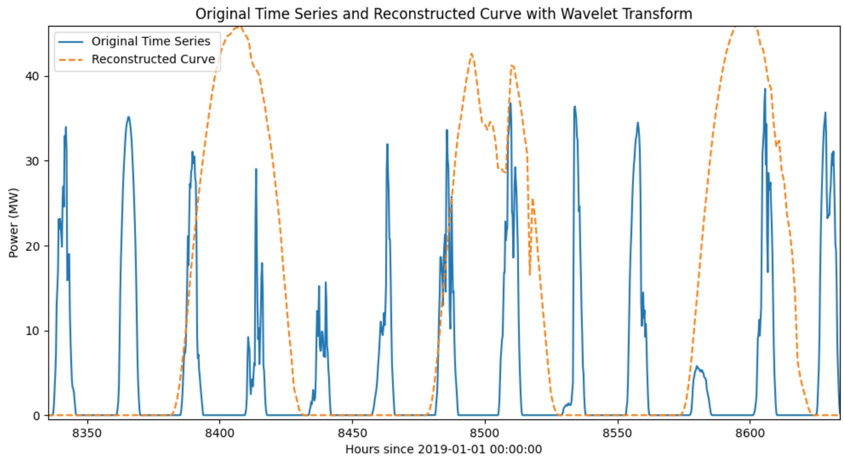

图 2.4　JSGF001 拟合结果局部

可以看到通过小波变换可以较好地拟合出大致的变换趋势，但是在具体的以日为周期的昼夜变换方面，却无法很好地做出周期性的拟合，因此小波变换不满足本文的要求。所以本文尝试使用傅里叶级数进行拟合。

2.3.3　傅里叶级数

傅里叶级数是以法国数学家约瑟夫 · 傅里叶（Joseph Fourier）的名字命名的一种数学工具，它用于分析和表示周期性函数。傅里叶级数的核心思想是将任何周期性函数表示为正弦和余弦函数的加权和。傅里叶级数在信号处理、图像处理、通信、声学、量子力学以及许多其他领域都有广泛应用。

其是一种将周期函数分解为三角函数（正弦和余弦）的线性组合的方法。这个方法的基本原理在于：任何周期函数都可以表示为一组简单的三角函数之和，每个三角函数具有一个特定的频率、振幅和相位。傅里叶级数的一般形式如下[11]：

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \tag{2.7}$$

其中：

- $f(t)$ 是周期性函数，随时间 t 变化。
- ω 是基础角频率，与函数的周期 T 相关，$\omega = \frac{2\pi}{T}$。
- n 是整数，表示频率的倍数，取值为 $0, 1, 2, 3, \ldots$。
- a_0 是常数项，表示函数的平均值或直流分量。
- a_n 和 b_n 是系数，分别对应于 $\cos(n\omega t)$ 和 $\sin(n\omega t)$ 项的振幅，它们决定了正弦和余弦分量的权重。

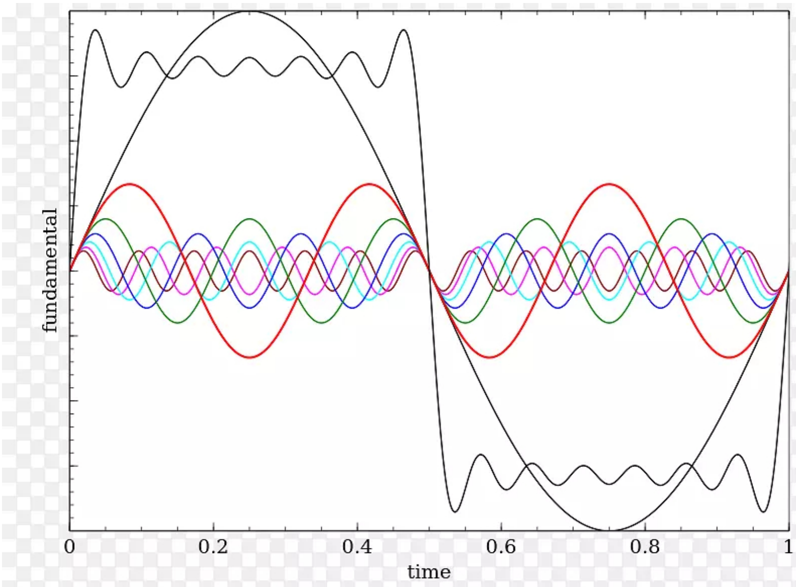

图 2.5　利用傅里叶级数拟合方波

如果某次分量的频率为所定义的基波频率的整数倍，那么这个分量称作谐波。通过使用傅里叶级数，可以很好地拟合周期函数，因此本文选择使用傅里叶级数进行周期函数的拟合。

2.3.4 基于傅里叶变换的周期性特征提取

当给定对应的出力数据所储存的文件路径后，便可读取数据并保存在 Dataframe 中。在读取数据时还应当注意需要将时间戳转换为距离 2019 年 1 月 1 日 0 时整的小时数，以便于级数的求解。本文选择了使用 Python 的 sklearn 库实现周期函数的拟合。

在拟合前，需要先构建傅里叶级数特征，在该步骤中，确定傅里叶级数的基础角频率，即基波频率，以及傅里叶级数的项数尤为重要。下面是该部分的 Python 代码段：

```python
# 基础角速度
omega_y = 2 * np.pi / (365 * 24)
omega_d = 2 * np.pi / 24

# 构建傅里叶级数特征
fourier_features = np.column_stack(
[np.cos(omega_y * n * hours) for n in range(1, num_terms + 1)] +
[np.sin(omega_y * n * hours) for n in range(1, num_terms + 1)] +
[np.cos(omega_d * n * hours) for n in range(1, num_terms + 1)] +
[np.sin(omega_d * n * hours) for n in range(1, num_terms + 1)])
```

对于常用的傅里叶级数，通常只会选取一个基波频率，但本文选择两个基波频率以更好符合气象数据的变化规律。在数学上，傅里叶级数作为无穷级数可以完美拟合所有周期函数，但是在实际应用中，我们只能选取特定的项数以达到平衡拟合效果和计算量的目的。当选定一个基波频率后，后续的项的角速度为基波角速度的整数倍，其称为谐波。谐波次数越高，便越可以在一个周期更小的部分里修正正弦函数与时间周期函数之间的差异。

但是对于气象数据而言，其不仅仅只有一个周期，相反，其在较大的以年为单位的周期之外，还有较小的以天为单位的变化周期，因此本文创新性地选择两个不同的角频率作为基波角频率。在上述代码中，omega_y 作为年基础角速度，其对应的周期为

$$T_y = \frac{2\pi}{\omega_y} = 365 \times 24\text{ 小时} \tag{2.8}$$

同样道理，omega_d 作为日基础角速度，其对应的周期为

$$T_y = \frac{2\pi}{\omega_y} = 24\text{ 小时} \tag{2.9}$$

这时，只需要选取适当的 num_terms 作为傅里叶级数的项数，即可进行拟合。

如果不采用双基波角速度的方法，我们同样可以使用较多的高次谐波达到同样的效果，但是由于年角速度为日角速度的 365 倍，因此想要达到同样的效果，项数应该至少大于 $365 \times 2 = 730$ 项，这将大大加重计算的负担，而双基波角速度可以跳过中间的相关度较小的谐波，达到同样的效果。

在这里以发电单元 JSGF001 为例，进行历史处理数据的拟合。参数设置上 “number_term” 选择设置为 45 进行拟合以下为拟合结果：

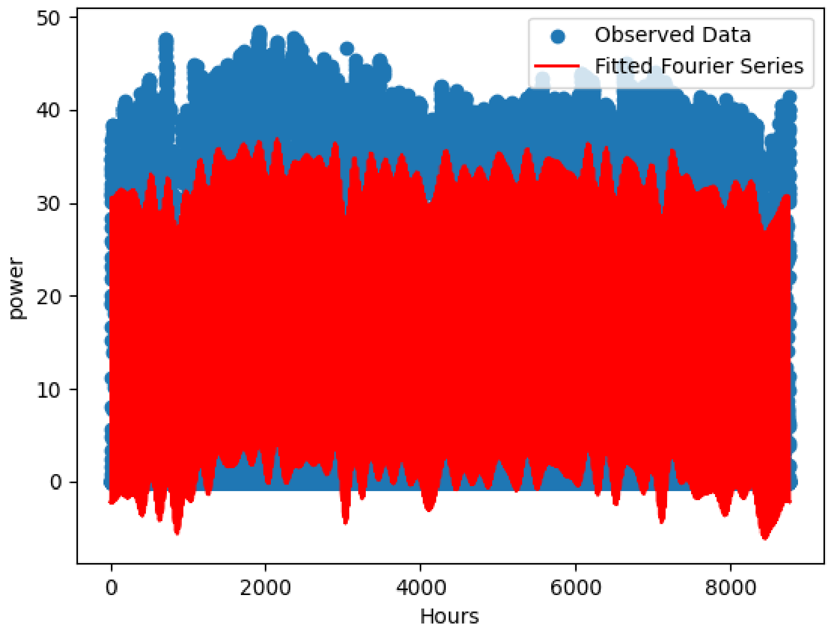

图 2.6　JSGF001 全年数据拟合结果

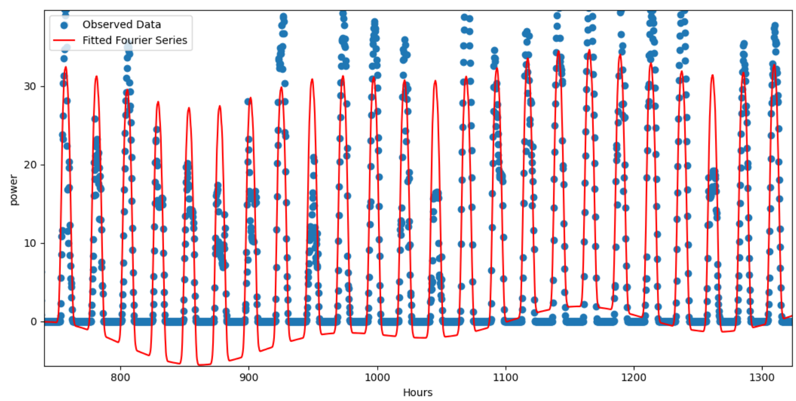

图 2.7　JSGF001 拟合结果局部

与之相对应的，本文还使用了常规的单基波角速度进行对照。在单基波角速度中，“number_term” 选择设置为 90 进行拟合，此时的拟合结果与双基波角速度的拟合结果具有同样的项数，因此消耗的资源也相同。拟合结果如下：

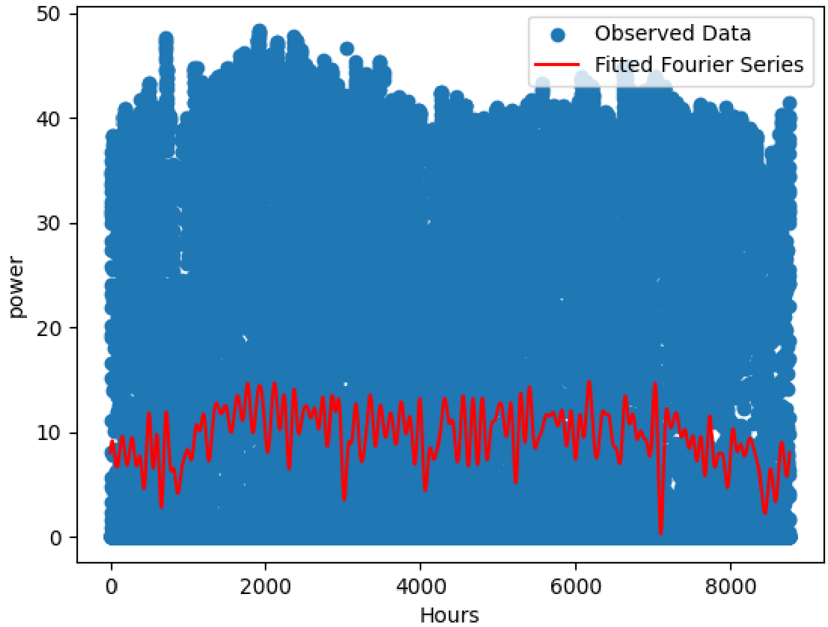

图 2.8　使用单基波角速度拟合结果

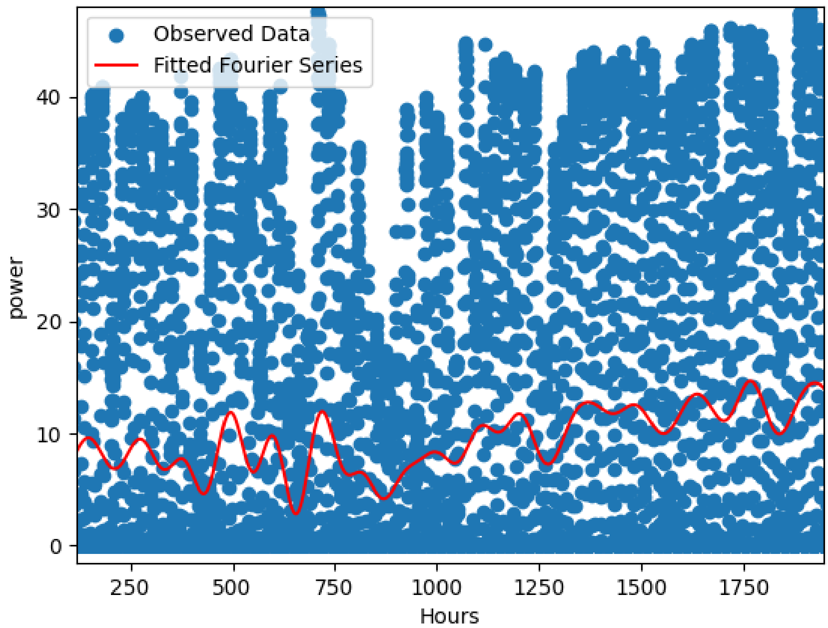

图 2.9　使用单基波角速度拟合结果局部

可以清楚地看到，在同样的项数前提下，单基波角速度的拟合结果与实际观测数据相差巨大，无法具备作为对照预测数据的条件，也不具有现实意义。而双基波角速度下的傅里叶级数可以较好地抽象出出力数据背后的周期性，具备作为对照的条件，想要得到相同质量的拟合结果，传统方法需要将“number_term”设置到 400 以上，这对于普通的个人计算机而言是不能接受的。

该方法实现了在较为局限的算力条件下获得更为出色的拟合结果。也可以使对分布式光伏预测的结果更为准确。