

# 汽轮发电机基础的沉降计算

李鹏, 何喜洋, 黄长华

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 汽轮发电机是电厂的心脏, 又是高速运转的精密仪器。为了保证汽轮发电机的正常及持久运行, 作为其支撑结构的汽轮发电机基础, 其设计要求尤其是沉降差的限制很高。地基基础设计规范提供的沉降计算方法适用于独立基础, 其计算出来的沉降是一个点的沉降, 不适用于汽轮发电机基础。研究内容共有三个部分: 第一, 通过适当的假定, 将规范中独立基础的沉降计算方法向其他任意的基础形式进行推广; 第二, 以具体工程实例为基础, 展示由前面的计算假定建立的设计方法, 进行汽轮发电机基础的沉降计算; 第三, 试图从理论上统一基础的沉降计算、基础内力分析方法, 简化设计流程, 并对需要进行调心计算的动力机器基础和其他对基础倾斜敏感的建构筑物, 建立更具一般性的、由沉降所控制规范准则, 该方法尤其适用于土层分布复杂的情况。

**关键词:** 汽轮发电机基础; 筏板基础; 沉降计算; 动力机器; 调心计算

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)S1-0119-04

## Settlement Calculation of Turbine and Generator Foundation

LI Peng, HE Xiyang, HUANG Zhanghua

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** turbo generator is the heart of the power plant, and is a precision instrument for high speed operation. In order to ensure the normal operation of the turbo generator, as the foundation of its supporting structure, the design requirement (especially settlement control) is very high. The settlement calculation method provided by the foundation design specification is applicable to the independent foundation, and the calculation result is a settlement of a point, which is not suitable for the turbine generator foundation. There are three parts in this paper. First, through appropriate assumption, the settlement calculation method based on the independent foundation is extended to other arbitrary foundation forms. Second, based on the actual engineering practice example, the design method based on the above assumptions is shown; third, the author tries to simplify the design process, and to establish a more general standard for the eccentric design of dynamic machine and other building and structure, which is sensitive to uneven settlement.

**Key words:** foundation of turbine and generator; raft foundation; settlement calculation; power machine; eccentric calculation

汽轮发电机是电厂的心脏, 又是高速运转的精密仪器。为了保证汽轮发电机的正常及持久运行, 作为其支撑结构的汽轮发电机基础, 其设计要求自然也很高。例如, 某火电厂汽轮发电机的《基础设计要求》中就有如下关于基础的变形和刚度的技术要求: “基础顶部台面的偏差极限: 第 4.1 条规定, 在机器的静态条件下, 基础的相对偏差在各方向不应超过 0.5 mm; 第 4.2 条规定, 如果经计算不能满足上述限制, 请计算值尽快通知机组制造厂”。某核电站汽轮发电机厂家向设计院提出了如下关于

基座支撑台板的下部结构应满足的要求:

1)  $h_z(i) < 0.5 \text{ mm/MN}$ :  $h_z(i)$  是第  $i$  个轴承点竖向柔度。

2)  $h_y(i) < 0.5 \text{ mm/MN}$ :  $h_y(i)$  是第  $i$  个轴承点横向柔度。

除非是采用桩基或者天然基础的持力层是基岩, 否则 0.5 mm 的变形和沉降限制是不现实的。笔者认为, 汽轮发电机基础在施工完毕后, 结构自身重量以及机器重量基本已经令土层完成大部分的沉降并进入稳定状态, 此时再于轴承座上放置汽轮机与发电机的转子, 0.5 mm 的沉降或沉降差异是可以实现的。笔者在此提及 0.5 mm 的沉降限值只是为了强调汽轮发电机基础沉降量和沉降差等计算的重要性。地基基础设计规范并没有明确地提供筏

收稿日期: 2015-11-11

作者简介: 李鹏, 男, 河南洛阳人, 工程师, 学士, 主要从事核电站结构研究工作(e-mail)1581888818@139.com。

板基础的沉降计算方法；尤其没有提供类似上述厂家要求的沉降差计算方法。这也是本文研究的内容。

## 1 规范的局限性

地基基础设计规范<sup>[1]</sup>提供的沉降计算方法适用于独立基础，其计算出来的沉降是一个点的沉降。该方法主要基于如下几个原则：(1)用半无限匀质线弹性变形体在局部均布压力下的竖向应力解析解作为附加应力；(2)不考虑基础及上部结构的刚度；(3)以压缩模量及  $e-p$  曲线为基础的分层总和法计算各个土层压缩并求和即得基础角点、中心点的沉降。上述原则与假定对于独立基础而言是方便的、完善的，因为独立基础的沉降相对其他基础形式而言最为简单。虽然规范没有直接说明上述理论能够直接应用于其他基础形式，但从理论本身看来，推广到其它基础形式并不困难。

然而，规范的沉降计算方法在工程应用中存在下面的局限性：(1)没有从条文上明确地指出该方法对于其它基础形式如何应用，让工程师无所适从；(2)对于基础的内力与承载力计算时规定了“弹性地基上的梁和板计算理论”的适用范围，但对于沉降计算与内力计算方法的联系避而不谈；(3)没有像桩基础那样，对土层、基础及上部结构共同作用方法给予支持。

本文的研究内容有三个部分：(1)通过适当的假定，将规范中独立基础的沉降计算方法向其他任意的基础形式进行推广；(2)以具体工程实例为基础，展示由前面的计算假定建立的设计方法，进行汽轮发电机基础的沉降计算；(3)试图从理论上统一基础的沉降计算、基础内力分析方法，简化设计流程，同时，对于需要进行调心计算的动力机器基础和其他对基础倾斜敏感的建构筑物，建立更具一般性的、由沉降所控制规范准则(该方法尤其适用于土层分布复杂的情况)，供工程师参考。

## 2 筏板基础的沉降计算

本文用到的计算假定如下：(1)沉降计算时，基础底面上地基的任意点的刚度等于以该点为形心时按规范分层总和法(地基规范第5.3.5条)计算的刚度，即附加应力除以该点的最终沉降量；(2)计算出沉降刚度以后，以此为地基的竖向线弹性刚

度，用于模拟整个地基，并于上部结构、基础一起建入计算模型，此处忽略了地基的剪切刚度但考虑了上部结构的刚度；(3)计算模型进行静力分析后获得的基底各点竖向变形值即为基础各点的最终沉降量，如果荷载包含分项系数，则该模型分析获得的结构、基础内力可用于承载力与配筋设计；(4)对于桩基础的情况，上述竖向线弹性刚度为天然地基时的竖向刚度(地基规范第R.0.1条)与桩身刚度之串连结果再除以桩的数量。如图1：根据规范的分层总和法计算基底上各点(实际上是钻孔点)的沉降，获得整体计算模型所需的竖向刚度；在土层均匀的情况下，可只计算基础形心点。如图2：如果基础形式的桩基，则同样按照实体深基础分层总和法，计算桩端标高处各点沉降作为整体计算模型的竖向刚度。

## 3 工程实例

某600 MW火力发电厂的汽轮发电机基础上部结构为巨型框架，基础形式采用桩筏基础。厂址基本地震烈度为6度，设计基本地震加速度为0.691g，建筑场地类别三类。地基土主要粘性土与粉细砂组成，两者之间有淤泥夹层。

淤泥层进行真空堆载预压后的地基承载力特征值为60 kPa，筏板基础下回填土层的地基承载力特征值约为80~100 kPa。由于土层分布均匀，故可根据假定(1)进一步认为地基各点的刚度相等，只需要计算筏板形心处的土层竖向刚度。计算过程如表1所示。

按照表1计算获得的筏板底面中点沉降量是43 mm，调试计算模型中的竖向土弹簧刚度，使得其在自重、机器重量以及其它荷载的准永久值作用下对应节点的竖向变形值也为43 mm，计算模型建立即认为完成。可根据此模型查出结构其它部分任意点的沉降值。按照假定3，采用假定1整体分析后的梁、板、柱、筏板内力还可以用于配筋设计，大部分构件的配筋设计由程序完成，此处不再详述。

## 4 调心计算新准则

动力机器基础设计中有个比较特殊的问题是基础的调心计算，汽轮发电机基础自然也不例外。调心计算的特殊性并不是在于调心计算本身(箱型基础设计规范<sup>[2]</sup>中也有类似的规定)，而是在于其限

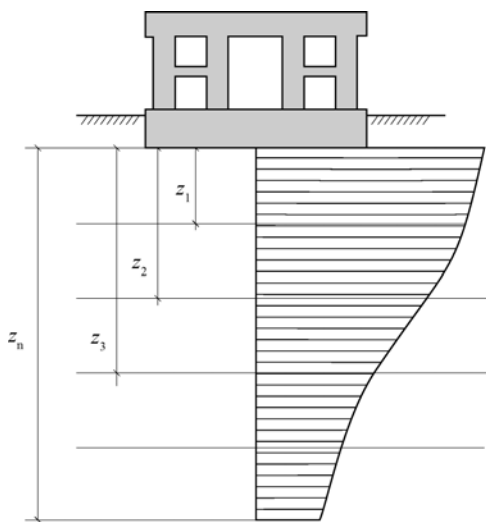


图 1 地基规范的分层总和法  
Fig. 1 Layered Summation Method

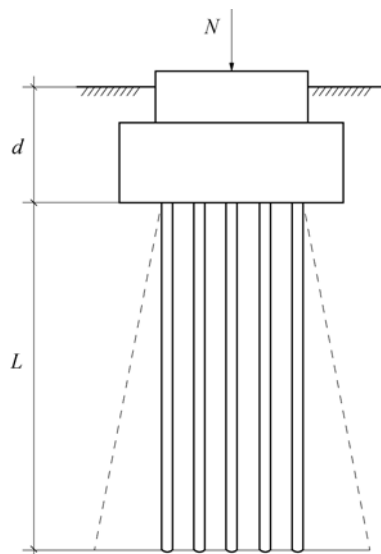


图 2 桩基情况下的推广  
Fig. 2 Promotion of Pile Foundation

表 1 分层总和法计算基座筏板底面形心的沉降量

Table 1 Settlement Calculation of Raft Base Centroid Using Layered Summation Method

| 参数 | 总土层数               | 矩形面积长度/m | 矩形面积宽度/m | 附加压力/kPa | 长宽比       | 压缩模量当量值/MPa | 最终沉降变形量/mm   |         |                    |       |                    |       |
|----|--------------------|----------|----------|----------|-----------|-------------|--------------|---------|--------------------|-------|--------------------|-------|
| 值  | 25                 | 46.700   | 16.000   | 238.000  | 2.919     | 55.058      | 43.146       |         |                    |       |                    |       |
| 项目 | 土特性参数及几何参数 / kN, m |          |          |          | 附加应力/kPa  |             | 各层压缩变形/kN, m |         |                    |       |                    |       |
| 层号 | 层顶深度               | 层底深度     | 层厚度      | 土重度      | 2 × 中点深宽比 | 4 × 附加应力系数  | 中点附加应力       | 中点自重应力  | 孔隙比 e <sub>1</sub> | 总应力   | 孔隙比 e <sub>2</sub> | 层变形量  |
| 1  | 0.000              | 0.300    | 0.300    | 9.000    | 不适用       | 0.000       | 0.000        | 1.350   | 0.725 2            | 1.350 | 0.725 2            | 0.000 |
| 2  | 0.300              | 4.100    | 3.800    | 9.000    | 不适用       | 0.000       | 0.000        | 19.80   | 0.668 8            | 19.80 | 0.668 8            | 0.000 |
| 3  | 4.100              | 7.000    | 2.900    | 9.000    | 不适用       | 0.000       | 0.000        | 49.95   | 0.649 4            | 49.95 | 0.649 4            | 0.000 |
| 4  | 7.000              | 9.800    | 2.800    | 9.000    | 不适用       | 0.000       | 0.000        | 75.600  | 0.640 7            | 75.60 | 0.640 7            | 0.000 |
| 5  | 9.800              | 13.900   | 4.100    | 9.000    | 不适用       | 0.000       | 0.000        | 106.65  | 0.633 4            | 106.6 | 0.633 4            | 0.000 |
| 6  | 13.900             | 16.100   | 2.200    | 9.000    | 不适用       | 0.000       | 0.000        | 135.00  | 0.628 5            | 135.0 | 0.628 5            | 0.000 |
| 7  | 16.100             | 27.400   | 11.300   | 9.000    | 不适用       | 0.000       | 0.000        | 195.75  | 0.620 7            | 195.7 | 0.620 7            | 0.000 |
| 8  | 27.400             | 36.800   | 9.400    | 9.000    | 不适用       | 0.000       | 0.000        | 288.90  | 0.612 5            | 288.9 | 0.612 5            | 0.000 |
| 9  | 36.800             | 43.700   | 6.900    | 9.000    | 不适用       | 0.000       | 0.000        | 362.25  | 0.607 8            | 362.2 | 0.607 8            | 0.000 |
| 10 | 43.700             | 52.800   | 9.100    | 9.000    | 不适用       | 0.000       | 0.000        | 434.25  | 0.604 0            | 434.2 | 0.604 0            | 0.000 |
| 11 | 52.800             | 54.300   | 1.500    | 9.000    | 不适用       | 0.000       | 0.000        | 481.95  | 0.601 8            | 481.9 | 0.601 8            | 0.000 |
| 12 | 54.300             | 56.900   | 2.600    | 9.000    | 不适用       | 0.000       | 0.000        | 500.40  | 0.601 0            | 500.4 | 0.601 0            | 0.000 |
| 13 | 56.900             | 64.000   | 7.100    | 9.000    | 不适用       | 0.000       | 0.000        | 544.05  | 0.599 2            | 544.0 | 0.599 2            | 0.000 |
| 14 | 64.000             | 65.000   | 1.000    | 9.000    | 0.063     | 1.000       | 237.975      | 580.50  | 0.597 9            | 818.4 | 0.590 6            | 0.005 |
| 15 | 65.000             | 66.000   | 1.000    | 9.000    | 0.188     | 0.997       | 237.352      | 589.50  | 0.597 5            | 826.8 | 0.590 4            | 0.004 |
| 16 | 66.000             | 67.000   | 1.000    | 9.000    | 0.313     | 0.988       | 235.200      | 598.50  | 0.597 2            | 833.7 | 0.590 3            | 0.004 |
| 17 | 67.000             | 68.000   | 1.000    | 9.000    | 0.438     | 0.971       | 231.033      | 607.50  | 0.596 9            | 838.5 | 0.590 1            | 0.004 |
| 18 | 68.000             | 69.000   | 1.000    | 9.000    | 0.563     | 0.945       | 224.861      | 616.50  | 0.596 6            | 841.3 | 0.590 1            | 0.004 |
| 19 | 69.000             | 70.000   | 1.000    | 9.000    | 0.688     | 0.912       | 217.040      | 625.500 | 0.596 3            | 842.5 | 0.590 0            | 0.004 |
| 20 | 70.000             | 71.000   | 1.000    | 9.000    | 0.813     | 0.874       | 208.072      | 634.50  | 0.596 0            | 842.5 | 0.590 0            | 0.004 |
| 21 | 71.000             | 72.000   | 1.000    | 9.000    | 0.938     | 0.834       | 198.451      | 643.50  | 0.595 7            | 841.9 | 0.590 0            | 0.004 |
| 22 | 72.000             | 73.000   | 1.000    | 9.000    | 1.063     | 0.792       | 188.585      | 652.50  | 0.595 4            | 841.0 | 0.590 1            | 0.003 |
| 23 | 73.000             | 74.000   | 1.000    | 9.000    | 1.188     | 0.751       | 178.774      | 661.50  | 0.595 1            | 840.2 | 0.590 1            | 0.003 |
| 24 | 74.000             | 75.000   | 1.000    | 9.000    | 1.313     | 0.711       | 169.219      | 670.50  | 0.594 8            | 839.7 | 0.590 1            | 0.003 |
| 25 | 75.000             | 75.300   | 0.300    | 9.000    | 1.394     | 0.686       | 163.208      | 676.35  | 0.594 6            | 839.5 | 0.590 1            | 0.001 |

值非常严格。一般动力机器基础的偏心率限制是5%，汽轮发电机基础甚至是3%。从理论上讲，调整基础的底面形心与静荷载中心重合也是可能的，因为实际意义不大，为了简化计算故很少这么处理。

规范的初衷明显是针对天然基础，因为偏心率小意味着基底反力是均匀的，设备基础将没有沉降差异(柔性筏板基础)或倾斜(刚性的块式基础)，于是能满足轴系安装及运行的苛刻要求。

并不是所有工程师都认同上述观点。因为单纯从字面上理解，该规范条文是有歧义的。歧义在于：桩基础是对于承台底面形心还是群桩的中心而言呢？只有编制规范的人才能回答这个问题；又或者他在编制此条规定之时根本未考虑桩基础的情况。无论是《动规》<sup>[3]</sup>还是《土规》<sup>[4]</sup>均在此条规定上略去了条文说明。幸运的是，我们在一本较为古老的(1986年第二次印刷)第一机械工业部设计研究院编制的《动力机器基础设计手册》<sup>[5]</sup>上找到了答案：“2. 机组偏心的限值为了防止机器基础偏沉，保证机器的正常运转和简化动力计算，机组(机器、基础和基础上回填土的总称)的总重心应力求与基础底面形心在同一垂直线上，如偏心不可避免时，其偏心距与偏心方向的基础底面边长之比不得大于下列限值……”。这就是《动规》编制此条要求的初衷。基于这一点，我们容易得出结论：当设备基础为桩基(桩的类型以及桩径相同)且土层分布均匀时，基底形心不能再理解为承台底面的形心，而应该理解为群桩的中心，这样就能保证每根桩的受力和沉降一致，基础自然不会有偏沉。

最让人头疼的莫过于以下几种情况：(1)基础方案是天然基础，土层分布不均匀；(2)桩基础，土层分布不均匀，调心后即使预先假定每根基桩的反力一样也将获得不同的基桩沉降量从而导致基础倾斜；(3)天然基础与桩基础并存的情况，问题变得更为复杂。

如果嵌岩桩或者端承桩的持力层是坚硬土层，则调心计算是多余的，只要有把握认为基础的倾斜非常微小。对于摩擦桩和天然基础与桩基并存的情况，调心计算同样毫无意义，此时，工程师应该回到规范编制的初衷，即严格控制基础沉降差或倾斜。最好的方法是计算沉降差或倾斜并满足机器制造厂提出的限值要求。该限值一般在与机器配套的“基础设计要求”中体现。本文第2、3节提出的沉降计算方法能够计算出前述这些沉降差异，笔者认为比调心计算中的“偏心率限制”准则更具一般性，可作为规范编制的参考依据。

## 5 结论

由于计算机技术的发展，结构规范对于上部结构的分析方法已经逐渐从线性向非线性过渡。例如新版混凝土规范 GB 50010—2010 对于框架柱的内力分析时结构层面二阶效应已经强制工程师考虑，这意味着结构分析时必须采用几何非线性方法。相比之下，地基与基础设计规范中对整体分析方法的要求有点逊色，连进行“地基—基础—上部结构”共同作用分析所需要的最简单、最基本的参数(例如基床反力系数、地基水平抗压刚度系数、桩竖向与水平弹簧刚度系数)都没有明确规定。电力行业中涉及的众多土建结构系形形式式的特种结构，要较为合理地设计这些结构和它们的基础，需要比通用设计规范更详尽的标准和要求。

### 参考文献：

- [1] GB 50007—2011, 建筑地基与基础设计规范[S].
- [2] JGJ 6—2011, 高层建筑筏形与箱形基础技术规范[S].
- [3] GB 50040—1996, 动力机器基础设计规范[S].
- [4] DL 5022—2012, 火力发电厂土建结构设计技术规程[S].
- [5] 第一机械工业部设计研究院总院. 动力机器基础设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

(责任编辑 郑文棠)