

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.010

# 《塔式太阳能光热发电站设计标准》 结构设计内容解析

李红星<sup>✉</sup>, 何邵华, 杜吉克, 易自砚

(中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 西安 710075)

**摘要:** [目的] 《塔式太阳能光热发电站设计标准》GB 51307是塔式光热电站的综合性标准, 标准对相关特种结构设计给出了原则性的规定。为使大家应用《塔式太阳能光热发电站设计标准》进行相关结构设计时能够正确理解条文和条文说明, 本文对该标准结构设计部分的相关规定进行了详细的解释和解析。[方法] 结合标准规定从一般规定、抗震设计、地基与基础、吸热塔结构和熔盐泵支架等几个方面阐述了标准制定背景, 介绍了国内外常见的吸热塔结构型式、熔盐泵基础型式、定日镜基础型式等, 对结构控制指标、吸热塔阻尼比等特殊问题进行了分析和讨论。[结果] 通过标准制定背景和特种结构型式的介绍, 以及特殊问题的分析和讨论, 对塔式太阳能电站中特种结构的设计、原则性规定有了更进一步的认识。[结论] 为《塔式太阳能光热发电站设计标准》的工程应用奠定了基础, 并给出了进一步研究的建议。

**关键词:** 塔式太阳能电站; 设计标准; 结构; 控制指标; 阻尼比

**中图分类号:** TK519; TU359

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8676(2020)02-0065-05

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Analysis of Structural Design of “Standard for Design of Solar Power Tower Plant”

LI Hongxing<sup>✉</sup>, HE Shaohua, DU Jike, YI Ziyuan

(Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China)

**Abstract:** [Introduction] “Standard for Design of Solar Power Tower Plant” (GB 51307) is a comprehensive standard for solar power tower plant. The standard provides a principle for the design of related special structures. In order to understand the standard provisions and commentary completely when using “Standard for Design of Solar Power Tower Plant”, the paper aims to explain and parse the relative regulations of the structure parts of the standard. [Method] Combining with the standard stipulation, the background of standard formulation was elaborated from the aspects of general requirements, seismic design, ground and foundation, receiver tower structure and support structure of molten salt pump. The common structural types of receiver tower, foundation type of molten salt pump and foundation type of heliostat at home and abroad were introduced. The special problems such as structural control index and damping ratio of receiver tower were analyzed and discussed for engineering application. [Result] Through the introduction of the standard background and special structural types, as well as the analysis and discussion of special problems, the design and principle requirements of special structures in tower solar power plant are further understood. [Conclusion] It provides a basis for engineering application of “Standard for Design of Solar Power Tower Plant” and gives some suggestions for further research.

**Key words:** solar power tower plant; design standard; structure; control index; damping ratio

《塔式太阳能光热发电站设计标准》GB 51307

于2018年12月1日发布实施, 该标准为综合性标准, 涵盖了光热电站的所有专业内容。结构设计部分是其中的重要章节, 本文将对该部分内容中的一些条文编制背景及使用过程中可能会遇到的问题进

收稿日期: 2019-12-20 修回日期: 2020-01-20

基金项目: 中国电力工程顾问集团有限公司科技项目“太阳能光热发电站吸热塔结构体系研究”(DG1-T03-2016)

行解释和解析。

## 1 一般规定

塔式太阳能电站的单机容量一般不超过 150 MW，吸热塔塔高根据光资源的不同有所区别，国内第一批示范电站最小单机容量 50 MW，塔高一般超过 150 m。

考虑到目前国内高耸结构和电力行业抗震设计标准中，规定超过 200 m 的烟囱为安全等级一级的结构。由于吸热塔结构类似烟囱结构，且塔顶布置有大质量荷载，考虑到结构的重要性和结构特点，故仅定义超过 150 m 的吸热塔为安全等级一级的结构。

## 2 抗震设计

由于光热电站的单机容量一般不大于 200 MW，故仅定义吸热塔结构、空冷凝汽器支撑结构和冷却塔结构为重点设防类。在本标准中仍保留了冷却塔是考虑到不能排除某些光热电站会采用冷却塔。

在吸热塔、蒸汽发生器、熔盐泵支架等结构中，有较多的重要设备，要么是大质量的罐体，或者是重要的管道。在传统电力项目设计中，很少考虑设备的地震作用计算问题，或者说考虑的不够全面。而在目前接触的涉外光热电站中，外方工程师均提出了设备地震作用计算问题。

事实上设备地震作用计算在我国《建筑抗震设计规范》GB 50011 中已有计算规定，故在本标准的中规定质量较大和重要的非结构构件与主体结构的连接，宜采用等效侧力法或楼面谱方法进行抗震验算。

## 3 地基与基础

### 3.1 地基基础设计等级

熔盐罐基础近年来在国际上出事故项目较多，有些就是因为基础不均匀沉降导致的，事故往往会造成很大的经济损失。故定义熔盐罐基础、吸热塔基础、空冷凝汽器基础等重要结构的基础设计等级为甲级。

### 3.2 熔盐罐基础

熔盐罐基础一般采用环墙式基础，基础内填充保温隔热材料，应选用易密实、隔热性好和承载力高的材料，一般选用陶粒土；也有项目采用其他刚性保温材料的基础型式，因研究成果不多而并未列入。熔盐罐基础要承受 500 多度熔盐的高温，以及

熔盐罐的重量和各种不利作用，需考虑温度应力和结构应力的耦合作用。熔盐罐基础布置图如图 1 所示，温度场计算分析结果如图 2 所示。

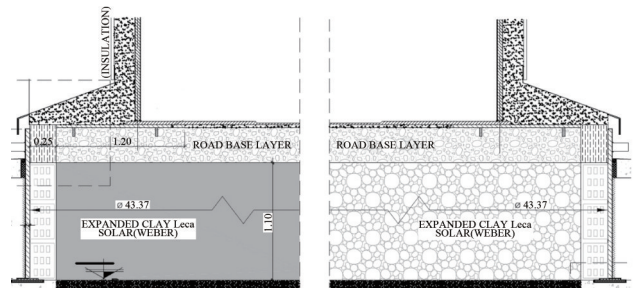


图 1 熔盐罐基础布置图

Fig. 1 Layout of molten salt tank foundation

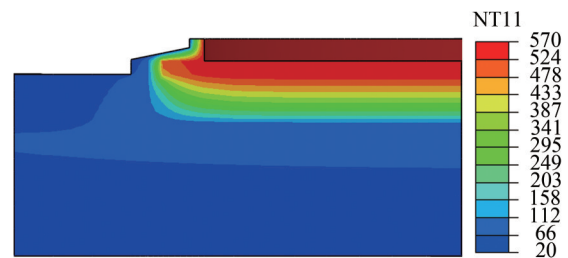


图 2 温度场计算分析结果

Fig. 2 Analysis results of temperature field calculation

### 3.3 定日镜基础

定日镜基础一般为单桩基础，虽然对每个定日镜而言一旦基础破坏不会对全厂造成较大的损失，但如果大面积破坏就会影响全厂发电效率。且定日镜基础往往要计算基础的变形，并且该变形值要求严格，所以将其定义为乙级。

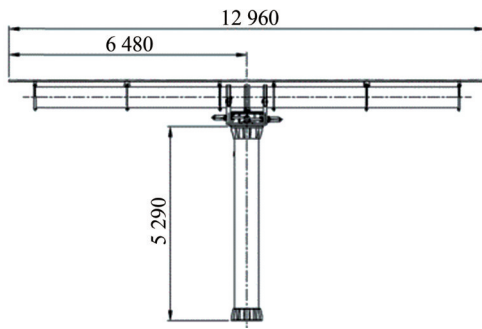
定日镜单桩基础主要有两种型式，一种为土体内为钢筋混凝土灌注桩，地面以上为钢桩（如图 3 所示）；一种为桩柱一体的型式（如图 4 所示）。需要注意的是，定日镜基础除了要满足结构控制指标外，还需要满足工艺控制指标。工艺控制指标一般是工作荷载下的基础顶位移和转角要求，该数值往往很小（比如 1.5 mrad 左右），经常是控制指标。

同时也发现，定日镜基础为短桩基础，传统计算理论不能很好的进行计算分析，需要依赖工程试桩数据和已有文献资料进行设计。

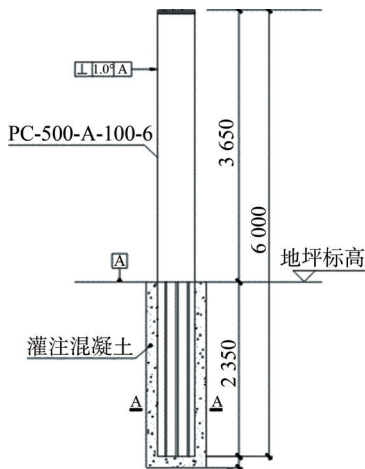
## 4 吸热塔结构

### 4.1 结构型式

最初的吸热塔结构一般为纯混凝土结构，如西



(a) 分离式基础



(b) 桩柱一体基础

注: 图中尺寸单位为 mm。

图 3 定日镜基础

Fig. 3 Heliostat foundation

西班牙 Gemasolar 太阳能电站 (图 4a), 一般来讲, 混凝土吸热塔结构刚度有保障, 容易达到工艺要求的位移目标。但施工周期相对较长, 可能是塔式太阳能电站的关键工期。由于塔内有较多的管道和设备, 塔顶有大量的吸热器需要附着在结构上, 那么就需要在筒壁上设置较多的埋件, 会造成较大的施工困难。目前纯混凝土结构类型已较少采用。

钢结构冷却塔在我国中控德令哈示范电站 (图 4b) 和美国 Ivanpah 电站 (图 4c) 也有应用, 一般来讲钢结构冷却塔刚度相对较小, 在美国 Ivanpah 电站的其中一座吸热塔上装了一套 TMD 以减小风振位移。

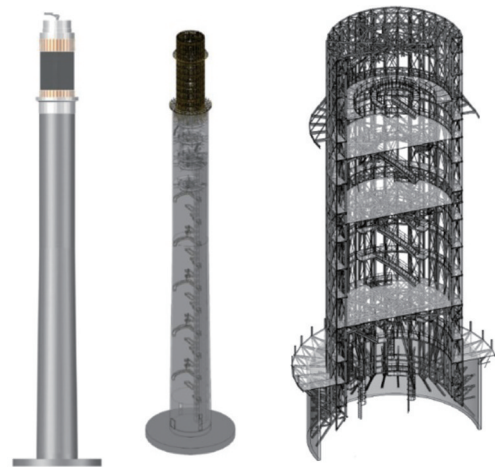
近年来最常用的吸热塔结构型式为混合结构型式 (如图 5 所示), 即下部采用混凝土结构, 上部设备密集部分采用钢结构。混合结构吸热塔兼顾了混凝土结构刚度大和钢结构加工安装方便的优点。



(a) Gemasolar 电站 (b) 中控德令哈示范电站 (c) 美国 Ivanpah 电站

图 4 钢结构吸热塔

Fig. 4 Steel receiver tower



(a) 塔外形图 (b) 塔内部 (c) 塔上部钢结构

图 5 混合结构吸热塔

Fig. 5 Hybrid receiver tower

目前也有一些国际项目中吸热塔采用整体吊装的模式, 这种方案就需要在结构下部设置较大的吊装孔, 孔洞宽度一般超过 20 m, 高度超过 40 m, 给结构设计工作带来了新的挑战。

#### 4.2 设计依据

吸热塔是典型的高耸结构, 截面高宽比较大, 结构在风荷载作用下的内力经常是最不利设计工况。《塔式太阳能光热发电站设计标准》针对吸热塔仅给出了原则性的规定, 目前还没有针对吸热塔的专用设计规范, 相关的能源行业标准《太阳能热发电厂吸热塔结构设计规范》正在编制中。

在《塔式太阳能光热发电站设计标准》中所列的设计依据中没有给出《烟囱设计规范》GB 50051,



主要目的是强调吸热塔不是烟囱。事实上现阶段国内外关于吸热塔的设计工程中,主要参考的设计标准进行仍然是《烟囱设计规范》GB 50051、《高耸结构设计规范》GB 50135、《Code Requirements for Reinforced Concrete Chimneys and Commentary》ACI 307-08和相应的一些通用标准。

设计工作中发现,吸热塔不同于烟囱结构,也不同于常见的高耸结构;主要表现在结构质量分布不均匀、结构刚度分布不均匀、结构外形有突变、在结构上部往往布置有多个设备层。这些特征决定了结构的风荷载作用和地震作用计算与常规结构有较大的不同。

所以现阶段在没有针对性标准的情况下,结合类似规范进行设计的同时,进行一些必要的试验研究是必要的,也是各设计单位常用的做法;这些试验主要是风洞试验。

#### 4.3 抗风问题

由于风荷载作用往往控制了截面大小和内力,所以风参数的选取就十分重要,其中阻尼比又是其中一个重要的参数。在我国设计规范中,混凝土高耸结构的阻尼比取值均为5%,与国外规范有较大的差异。

某国外光热电站工程项目中,外方工程师基于文献[1-2]的实际测量数据,认为结构阻尼比应取0.7%,并进行了相应的风洞试验,试验结果表明基底弯矩和塔顶位移均为实际设计值的1.4倍以上。事实上,高耸结构及高柔结构的阻尼比是较低的,但是否能够低到0.7%的水平值得商榷。实测阻尼比相对较低与实测时的基本风压有较大关系,当风压较小时,结构处于完全弹性状态,阻尼比会很低;当风压较大时,结构会出现微裂缝,且内部装置也会参与阻尼耗能,阻尼比会有所增加。文献[1]也指出,实测阻尼比虽然较低,但设计阻尼比可以取2%,这与考虑结构实际会出现的较大摆幅有关。同时,从ACI307-08的条文解释可以看出,钢筋混凝土烟囱阻尼比为1.5%左右,且是随着结构的应力水平和裂缝开展情况变化的。

可以看出,风荷载作用下结构阻尼比取值仍有争议,由于这个参数对风致响应计算结果影响较大,所以还需要大量的研究和实测,综合考虑后确定合理取值。

#### 4.4 位移控制指标

一般来讲,塔顶位移指标既要满足结构专业的安全性要求,也要满足工艺专业的运行要求。设计时要考虑到塔顶如果有较大的位移,会对聚焦和发电效率有较大的影响。所以在风荷载较大的区域,可以采用减振装置控制位移;减振装置的做法在我国超高层和高耸结构中已经有普遍应用。

下一步的工作就是工艺专业从聚光效率和发电效率角度研究是否能提出新的控制指标,结构设计可从严控制。

### 5 熔盐泵支架

某工程熔盐泵支架与熔盐泵布置图如图6所示。

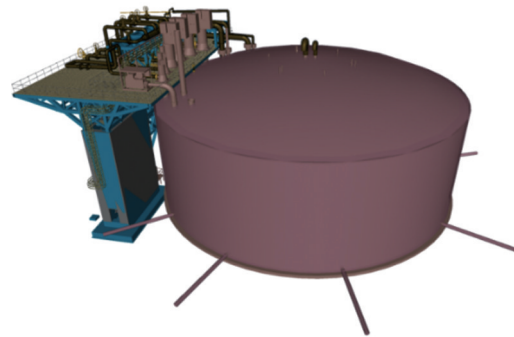


图6 熔盐泵布置图

Fig. 6 Layout of molten salt pump

熔盐泵支架上设置有多台立式泵,泵本体长度约6 m,下部输出轴长度约10 m,泵的转速约1 500 RPM。该熔盐泵需要伸入熔盐罐以搅动熔盐,为避免悬挑长度过长,熔盐泵支架应尽可能靠近熔盐罐。同时,熔盐泵平台的高度应尽可能的小,否则泵的输出轴会增长,造成泵的制造困难;但泵平台较低后,因为下部有熔盐罐,那么悬挑平台桁架高度就会减小,平台的刚度就很难保证,造成很大的设计困难。熔盐泵支架需要进行动力分析,满足厂家的刚度需求和振动速度需求等。

熔盐泵一般为国外设计和生产,国外公司按照国外设计习惯一般需要计算设备的地震作用,并用这个计算结果来设计连接部位。而设备地震作用计算恰恰是我国电力行业多年来忽视或者说没有重视的一个重要环节。设备地震作用一般可采用等效侧力法或楼面谱方法,当国外公司需要设计院提供楼面谱时,就需要研究楼面谱的提取方法。这时就需

要找合适的地震波, 进行动力时程分析后, 还需要设定一系列参数来确定楼面谱; 这些参数的选择都需要电力行业专家进一步研究。

## 6 结论

塔式太阳能电站中的特种结构设计是电力土建行业面临的新问题, 《塔式太阳能光热发电站设计标准》针对土建行业而言给出了原则性的设计规定。针对具体结构的具体问题仍需要进一步研究和解决, 如吸热塔的风荷载计算问题、定日镜基础短桩设计问题、设备与结构耦合设计问题等。

### 参考文献:

- [1] SATAKE N, SUDA K I, ARAKAWA T, et al. Damping evaluation using full-scale data of buildings in Japan [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(4):470-477.
- [2] CHO K P, TAMURA Y, ITOH T. Field measurement of damping in industrial chimneys and towers [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2001, 12(4):449-457.

### 作者简介:



李红星

李红星 (通信作者)

1976-, 男, 河南洛阳人, 教授级高级工程师, 结构工程, 博士, 主要从事火力发电厂及新能源电站土建结构设计与研究 (e-mail) lihongxing@nwepdi.com。

### 何邵华

1981-, 男, 甘肃定西人, 高级工程师, 结构工程, 硕士, 主要从事发电厂土建结构设计与研究 (e-mail) heshaohua@nwepdi.com。

### 杜吉克

1981-, 男, 山东即墨人, 高级工程师, 结构工程, 硕士, 主要从事发电厂及新土建结构设计与研究 (e-mail) dujike@nwepdi.com。

### 易自砚

1986-, 男, 甘肃张掖人, 工程师, 岩土工程, 硕士, 主要从事发电厂土建结构设计与研究 (e-mail) yiziyuan@nwepdi.com。

### 项目简介:

**项目名称** 太阳能光热发电站吸热塔结构体系研究 (DG1-T03-2016)

**承担单位** 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司

**项目概述** 项目通过调研国内外吸热塔结构设计及应用情况, 结合吸热塔结构的特点, 以及没有专门针对该类特殊构筑物的规范及规程的现实情况, 利用有限元软件开展吸热塔结构的体系研究, 同时开展吸热塔结构的风洞模型试验、振动台模型试验研究, 为吸热塔结构的设计提供依据, 为相关规范的编制提供支持。

**主要创新点** (1) 关于吸热塔结构设计的理念、方法及相关研究已达到国际领先水平, 成果具有普遍性, 在国内外塔式光热电站吸热塔结构设计中得到广泛应用, 如青海中控太阳能发电有限公司德令哈 50 MW 太阳能热发电项目、中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司哈密熔盐塔式 50 MW 光热发电项目、海西州多能互补集成优化示范工程光热部分等; (2) 对太阳能光热电站吸热塔结构进行气动弹性模型风洞试验研究, 分析结构的风振响应, 掌握了不同阻尼比情况下的结构风振响应规律; (3) 对太阳能光热电站吸热塔结构采用 1:18 缩尺模型进行模拟地震振动台试验, 分析结构的地震响应, 掌握了结构在地震作用下的薄弱环节。

(责任编辑 李辉)

