

太阳能热发电站中熔盐泵基础及上部钢结构平台的设计要点分析

青岛鸿瑞电力工程咨询有限公司 ■ 马其森* 龚娟

摘要: 总结归纳了太阳能热发电站中熔盐泵基础及上部钢结构平台设计中的要点及难点, 从静力分析角度定性讨论了熔盐泵基础的设计; 利用动力分析方法, 提取了熔盐泵支撑点处的刚度矩阵, 提供了平台地震反应谱, 并对熔盐泵支撑点处的动速度进行了控制。

关键词: 太阳能热发电站; 熔盐泵基础; 动力分析; 刚度矩阵; 平台地震反应谱

0 引言

由于传统能源发电项目会不可避免地造成一定程度的资源浪费与环境破坏, 因此, 人们对于新能源发电的需求越来越旺盛。随着新能源技术的不断成熟, 太阳能热发电项目凭借其环保性、稳定性、可调节性和易于并网等特点和优势, 逐渐占据了一定的市场份额。目前, 国内和国际上的太阳能热发电项目正在蓬勃发展, 对于太阳能热发电项目中一些重要的、独有的建筑物的研究也逐渐深入。

熔盐泵基础及上部平台结构是太阳能热发电站特有的结构形式, 而对这种结构的设计和研究仍处于起步阶段, 针对熔盐泵基础的设计和平台的动力分析的相关文献更是凤毛麟角。为了填补这方面的空白, 本文以某 200 MW 槽式太阳能热发电站中熔盐泵基础及上部钢结构平台为例, 详细阐述了该结构的设计要点。

1 工程背景

该槽式太阳能热发电站所在地为戈壁地貌; 场地平整、开阔, 无建筑物或高压线; 场区地势较为平坦, 地势由北向南降低, 坡度约为 1%。本期工程装机容量为 200 MW, 采用槽式导热油技术。

根据项目需要, 该项目所有设计均采用美国标准规范。

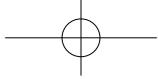
2 研究对象

夜间的持续发电能力是太阳能发电需要解决的重点问题。在太阳能热发电站中, 熔盐作为优良的传热储能介质, 解决了太阳能热发电站的储能痛点, 是太阳能热发电站中认可度最高的传热储能介质之一。

在槽式太阳能热发电站中, 导热液体为主要的吸热材料。导热液体通过槽式抛物镜集热后,

收稿日期: 2018-06-26

通信作者: 马其森(1985—), 男, 硕士、工程师, 主要从事动力设备、工业及民用建筑方面的研究。qisen319@163.com



作为加热源向发电机提供蒸汽。为解决夜间持续发电的问题，导热液体的部分热量通过热交换器传递给回路中循环的熔盐。该热量存储在热熔盐罐中，以便在日落之后释放，可使设备运行时间延长约6~15 h。熔盐泵将熔盐从熔盐罐中抽出，并使熔盐在回路中进行循环，其作为整个储-换热过程中的动力源，可被形象地比喻为储-换热系统的“心脏”。

由于需要存储大量的热量，熔盐罐的体积和高度相对其他罐体都大，因此，熔盐泵的管嘴很长且扬程较大。图1为熔盐泵的结构外形和吊装情况。



a. 结构外形



b. 吊装

图1 熔盐泵的结构外形和吊装情况

熔盐泵需要给熔盐循环提供较强的动力，因此，熔盐泵设备本身具有较强的动力特征；与此同时就要求熔盐泵基础及上部钢结构平台必须要给设备提供足够的稳定性，以保证设备的长时间正常运行。因此，熔盐泵基础及上部钢结构平台的结构动力特性显得尤为重要，一方面，结构必须提供足够的刚度，以保证熔盐泵支撑的稳定性；

另一方面，结构的动力特性必须满足设备运行的需要，以保证设备不因结构的较大振动而导致失效。

本文研究的主要内容即熔盐泵基础及上部钢结构平台的结构设计。

3 结构选型

熔盐泵基础及上部钢结构平台紧靠熔盐罐，因布置需要，整个熔盐泵基础及上部钢结构平台需在热交换器和熔盐罐之间，因此，可供结构布置的空间并不充裕——熔盐罐与热交换器之间的距离不足9 m。图2为熔盐区域局部布置图。

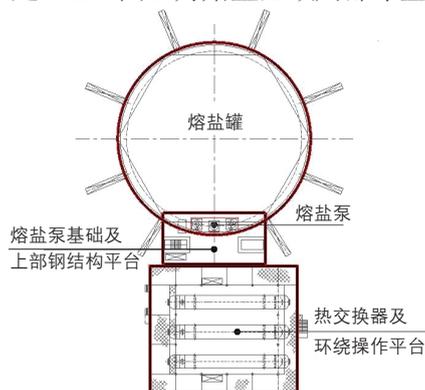


图2 熔盐区域局部布置平面图

熔盐泵需要布置在熔盐罐的顶部，其吸取熔盐的管道需要垂直伸入到熔盐罐中。因此，熔盐泵上部结构平台需要向熔盐罐顶部悬挑，以便将熔盐泵送至熔盐罐上方。考虑到悬挑长度，且熔盐泵周围的管道布置复杂，因此，顶部的支撑平台选用钢结构，在更易于保证悬臂长度的情况下，有利于管道布置。

熔盐泵布置高度超过20 m，考虑到熔盐泵运行的稳定性，熔盐泵的上部钢结构平台采用高17 m的混凝土筒体支撑，筒体内部可以布置钢梯，作为人员检修通道。从稳定性、设计和施工复杂程度及经济性来看，采用混凝土筒体支撑比采用钢结构支撑的优势明显。

熔盐泵基础及上部钢结构平台最终形态的三维效果图如图3所示。图中，下部为混凝土筒体基础，顶部为钢结构平台杆件。

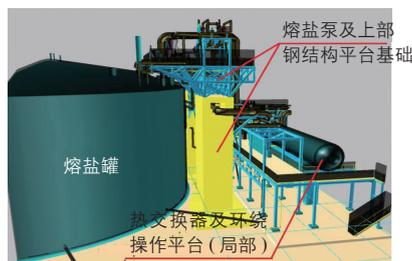


图3 熔盐泵基础及上部钢结构平台的三维效果图

4 基础形式

根据项目地勘信息,整个盐区承载力可以达到 500 MPa。因此,熔盐泵基础考虑采用独立扩展基础,基础底板平面尺寸近似为 6.7 m×16.7 m 的矩形。由于熔盐罐布置的原因,需要对熔盐泵基础进行切角,以避免与熔盐罐基础碰撞,具体的平面形状如图 4 所示。

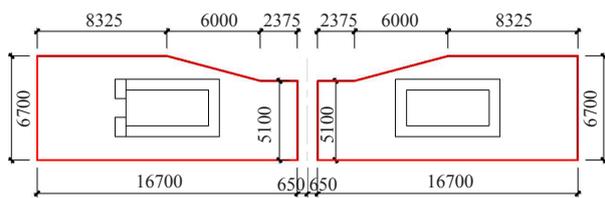


图4 熔盐泵基础平面图(单位: mm)

受工艺布置的限制,基础不能深埋,因此对基础的抗倾覆能力有较为不利的影响。上部钢结构悬挑,并在悬挑部位布置了动力设备熔盐泵,将会在基础上产生较大的倾覆力矩。考虑到该项目所在地的风速很大,因此,最不利工况下的倾覆力矩是基础设计时的一个重点,为保证设计符合美国标准规范和工艺要求,基础的稳定性验算是关键一环。

熔盐泵基础及上部钢结构平台这种结构体系在常规电厂项目中难以遇到,全新的结构体系使得设计几乎无现成的经验可以借鉴。从方案选择上来看,熔盐泵基础及上部钢结构平台可以从工艺布置上进行优化,从而使基础的最终形状、体量达到优化。因此,下文就基础的合理布置进行讨论。

在工艺布置上,要考虑熔盐泵基础的空间,允许熔盐泵基础的埋深加大,需要充分利用基础的覆土重量,抵抗上部较大的倾覆力矩作用。同时,在管道布置上,使基础间距和混凝土筒体间

距减小;混凝土筒体的矩形长边平行于悬挑方向,都将有利于结构的受力计算,使整个建筑物的结构部分更加有效、合理。混凝土筒体的合理结构布置如图 5 所示。

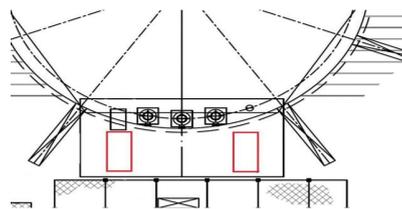


图5 混凝土筒体的合理结构布置平面图

5 平台动力分析

5.1 平台刚度矩阵

在本项目中,熔盐泵属于重要的动力设备,厂家要求提供平台尤其是熔盐泵支撑点处的刚度矩阵,用以熔盐泵的设计校准。

刚度矩阵的求法有很多种,其中,通用的有限元设计软件 SAP2000 可以直接提取刚度矩阵。根据厂家以往对于刚度矩阵的要求,按照单位荷载作用下的目标点位移的方法求解刚度矩阵,且厂家要求刚度矩阵为“6×6”的主对角元阵即可。因此,按照厂家要求,采用单位荷载求解位移法提取刚度矩阵,其公式为:

$$KV = F \quad (1)$$

式中, K 为刚度; V 为位移; F 为荷载。

其矩阵形式为:

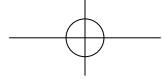
$$\begin{bmatrix} K_{11} & \cdots & K_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{61} & \cdots & K_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{11} & \cdots & V_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{61} & \cdots & V_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & & \\ & \ddots & \\ & & F_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,荷载 F 的下角标数字 1、2、3 分别代表 x 、 y 、 z 方向的力; 4、5、6 分别代表 x 、 y 、 z 方向的力矩。

由于所有荷载均施加单位荷载,取 $F_i=1$, 则刚度矩阵的主对角元应为 $[V]^{-1}$ 矩阵的主对角元。

其公式为:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & \cdots & K_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{61} & \cdots & K_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & \ddots & \\ & & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{11} & \cdots & V_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{61} & \cdots & V_{66} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3)$$



最终通过建模计算，熔盐泵上部钢结构平台的刚度矩阵的结果为：

$$\begin{bmatrix} 1.62 \times 10^5 & & & & & 0 \\ & 5.04 \times 10^4 & & & & \\ & & 5.57 \times 10^4 & & & \\ & & & 1.03 \times 10^4 & & \\ & & & & 1.11 \times 10^4 & \\ 0 & & & & & 5.96 \times 10^4 \end{bmatrix}$$

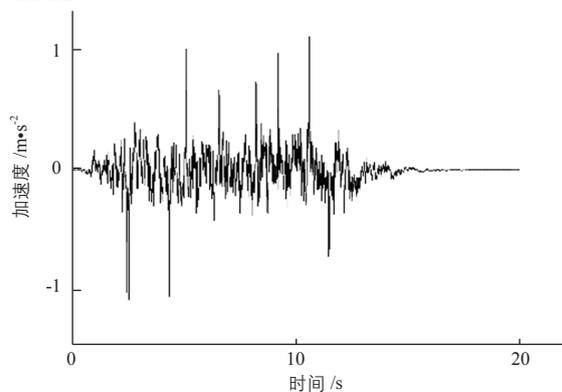
本项目中的刚度矩阵仅为主对角元矩阵，厂家的要求中忽略了其他方向上的刚度，这或许是基于厂家的工程经验的要求，不具有普遍意义。对于一般工程而言，为了准确设计熔盐泵，应该使用完整的刚度矩阵，其提取方法可以由SAP2000直接提取，或采用上述的单位荷载法提取，具体采用哪种方法由厂家习惯确定。

5.2 平台地震反应谱

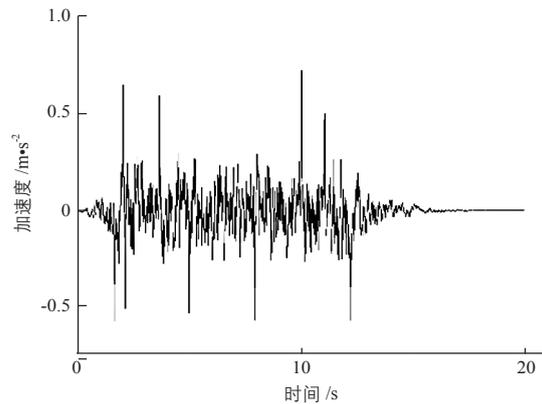
熔盐泵上部钢结构平台地震反应谱主要用于熔盐泵设备的设计，以确定平台的地震效应，确保熔盐泵在地震工况下的安全。本项目中厂家需要平台地震反应谱，由土建结构设计提供。

熔盐泵上部钢结构平台地震反应谱由SAP2000直接提取，其提取步骤为：1) 对熔盐泵基础及上部钢结构平台施加一定数量的人工地震波；2) 得到熔盐泵上部钢结构平台上关键点的地震响应；3) 由一系列地震响应得到平台地震反应谱。

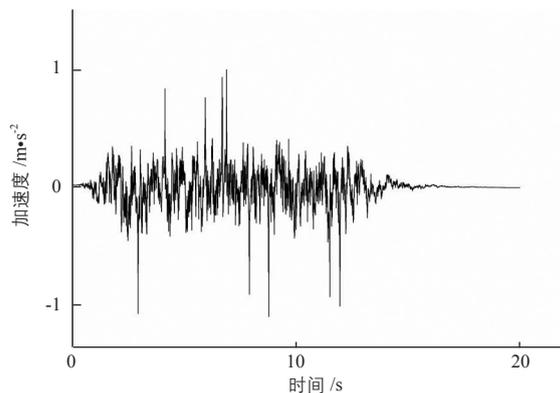
利用人工波软件SeismoSignal获取人工地震波6个，其中，3个是水平方向，3个是竖直方向。通过不同的组合，获得3组人工地震波。6条地震波的时程曲线如图6所示，H为水平方向，V为竖直方向。



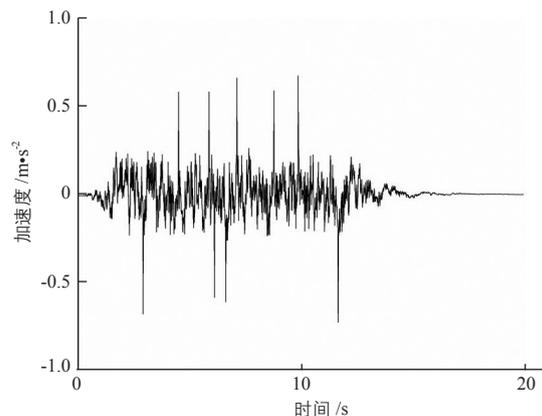
a. TH_H1 地震波时程曲线



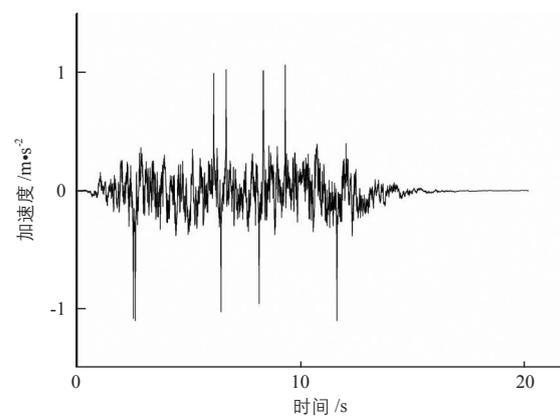
b. TH_V1 地震波时程曲线



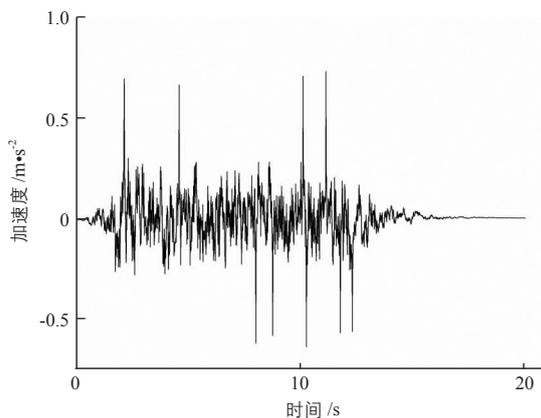
c. TH_H2 地震波时程曲线



d. TH_V2 地震波时程曲线



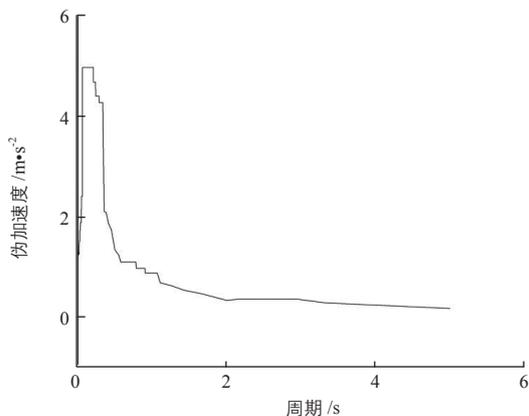
e. TH_H3 地震波时程曲线



f. TH_V3 地震波时程曲线

图6 水平方向、垂直方向的6条地震波的时程曲线

通过 SAP2000 软件加载地震波，获取熔盐泵支撑点处的反应谱曲线^[1]。其中，获取反应谱曲线所需要的参数有：以时间 T 为横坐标、PSA 为纵坐标，钢平台采用 3% 阻尼比，从而获取熔盐泵支撑点处 3 组地震波下的 3 个方向的反应谱。建筑结构中，一般选取楼层中心点代表整个楼层的反应信息。在本工程中，同样选取整个平台的中心点作为平台地震反应的关键点，以地震波下平台中心点 1141 点的 x 方向举例，如图 7 所示。

图7 平台中心点 1141 处 x 方向反应谱

5.3 平台动速度

平台动速度的激励力来自于熔盐泵在运行中转子的不平衡重力产生的扰力。通常通过以下指标控制扰力产生的平台振动：1) 控制平台动位移。在结构动力计算中，这是常用的一项指标，尤其在汽轮发电机基座设计中，国标要求对动位移进行控制。2) 控制平台动速度。类似的振

动设备厂家经常提出动速度的要求，在振动设备的支撑结构中比较常见。3) 控制平台动加速度。动加速度与动位移和动速度是同一系列的，众所周知，三者存在求导的关系^[2]。在本项目中，厂家提出了控制动速度的要求，其限值为 3.5 mm/s。

获取平台动速度，需要根据厂家提供的扰力和熔盐泵转速模拟熔盐泵转子的运行。转子在水平方向上的扰力大小，以弦函数的方式循环作用在熔盐泵上部钢结构平台上。针对不同方向，按照转速设计正、余弦函数。根据厂家提供的资料，弦函数周期为 0.04 s，共考虑 10 个周期，周期内步长取 20。两水平方向的弦函数扰力考虑耦合；竖直方向上扰力按照静力加载。

加载后的计算结果如表 2 所示。在熔盐泵上部钢结构平台上，每个熔盐泵通过螺栓与 4 根钢梁连接。在结构设计中，每个熔盐泵有 4 个支撑点，每个点都需要验证动速度，本文仅以熔盐泵支撑钢梁上的 796 号支撑点为例。

表2 796号支撑点处的动速度结果示例(单位: mm/s)

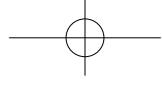
方向	796号点正向速度	796号点反向速度
U_1	0.0028	-0.003
U_2	0.0017	-0.0027
U_3	0.0015	-0.001
$0.707U_1$	0.00198	-0.00212
$0.707U_2$	0.001202	-0.00191
$0.707U_3$	0.001061	-0.0007

注： U_1 、 U_2 、 U_3 指不同的方向，为软件默认表示方式；0.707 指平均动速度

软件输出的是速度极值，考虑到函数为弦函数，因此，取速度平均值作为设计判断的依据。根据计算结果可知，无论最大平均动速度还是平均动速度，均满足厂家要求。

6 结语

熔盐泵基础及上部钢结构平台是太阳能热发电站结构设计中的关键和重要结构。本文对熔盐泵基础及上部钢结构平台中的基础(转第 53 页)



[10] 高隽. 神经网络原理及仿真实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

[11] 田景文. 神经网络算法研究及应用 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.

[12] Mubiru J. Predicting total solar irradiation values using artificial neural networks[J]. Renewable Energy, 2008, 33(10): 2329 – 2332.

[13] Mellit A, Pavan A M. A 24-h forecast of solar irradiance using artificial neural network: Application for performance prediction of a grid-connected PV plant at Trieste, Italy[J]. Solar Energy, 2010, 84(5): 807 – 821.

[14] Wang Z, Wang F, Su S. Solar irradiance short-term prediction model based on BP neural network[J]. Energy Procedia, 2011,12: 488 – 494.

[15] Yacef R, Benghanem M, Mellit A. Prediction of daily global solar irradiation data using Bayesian neural network: A comparative study[J]. Renewable Energy, 2012, 48: 146 – 154.

[16] Benghanem M, Mellit A. Radial basis function Network-based prediction of global solar radiation data: Application for sizing of a stand-alone photovoltaic system at Al-Madinah, Saudi Arabia[J].Energy, vol. 2010, 35 (9): 3751 – 3762.

[17] Cao J C, Cao S H. Study of forecasting solar irradiance using neural networks with preprocessing sample data by wavelet analysis[J]. Energy, 2006, 31(15): 3435 – 3445.

[18] Ma L, Yorino N, Khorasani K. Solar radiation (insolation) forecasting using constructive neural networks[A]. 2016 International Joint Conference on Neural Networks[C]. Vancouver, Canada, 2016.

[19] Mitchell T M. Machine learning [M]. Beijing: China Machine

Press, 2003.

[20] Park J, Sandberg I W. Universal approximation using radial-basis-function networks[J]. Neural Computation, 2014, 3(2): 246 – 257.

[21] Ding M, Wang L, Bi R. An ANN-based approach for forecasting the power output of photovoltaic system[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11: 1308 – 1315.

[22] Liu J, Fang W, Zhang X, et al. An improved photovoltaic power forecasting model with the assistance of aerosol index data[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2): 434 – 442.

[23] Mellit A, Massi P A, Lugh V. Short-term forecasting of power production in a large-scale photovoltaic plant[J]. Solar Energy, 2014, 105: 401 – 413.

[24] 叶林, 陈政, 赵永宁, 等. 基于遗传算法——模糊径向基神经网络的光伏发电功率预测模型 [J]. 电力系统自动化, 2015, (16): 16 – 22.

[25] 代倩, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于天气类型聚类识别的光伏系统短期无辐照度发电预测模型研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 28 – 35.

[26] Tao Y, Chen Y. Distributed PV power forecasting using genetic algorithm based neural network approach[A]. IEEE 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems[C]. Kumamoto, Japan, 2014.

[27] Kolentini E, Sideratos G, Rikos V, et al. Developing a matlab tool while exploiting neural networks for combined prediction of hour's ahead system load along with irradiation, to estimate the system load covered by PV integrated systems[A]. IEEE 2009 International Conference on Clean Electrical Power[C]. Capri, Italy, 2009. 太阳能

(接第 62 页) 设计及平台动力分析的重点进行了阐述。与汽轮发电机基座的设计相同，作为动力设备支撑结构，熔盐泵基础及上部钢结构平台需要进行动力设计，且动力设计的结果需要符合设备厂家的要求，并应满足动力设备基础的设计规范。从厂家提供的结构要求来看，熔盐泵基础及上部钢结构平台的动力设计仍遵循动力设备基础设计的基本要求，主要目标仍是控制熔盐泵上部钢结构平台的动位移、动速度或动加速度，保证在动力设备运行的情况下，熔盐泵上部钢结构平台不发生较大的动位移，从而保证设备的稳定运行。

项目实践过程中，设备厂家要求控制的是动速度，这一点与我国规范中限制动位移的要求类似：动位移与动速度为导数关系。但从设计统一的角度来看，针对太阳能热发电站中的熔盐泵基

础及上部钢结构平台，我国应尽快建立统一的动力计算规范。从规范的一致性考虑，熔盐泵基础及上部钢结构平台的动力分析最终应使用动位移作为限制标准^[3]。

由于目前同类结构的研究仍处在起步阶段，因此，本文中针对熔盐泵基础及上部钢结构平台的动力分析对今后类似结构的动力设计具有指导意义。今后应在积累足够的项目经验且成熟后，形成统一的设计规范。

参考文献

[1] 北京金土木软件技术有限公司, 中国建筑标准设计研究院. SAP2000 中文版使用指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.

[2] Clough R W, Penzien J. 结构动力学 第二版 (修订版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[3] GB 50040-96, 动力机器基础设计规范 [S]. 太阳能