

DOI: 10.19666/j.rlfed.202306105

# 弹簧支吊架荷载变化系数的选取与汽水管道支吊架优化设计

康豫军<sup>1</sup>, 安付立<sup>1</sup>, 吴晓俊<sup>1</sup>, 程勇明<sup>1</sup>, 孙克学<sup>2</sup>, 彭钰君<sup>2</sup>

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

2.华电国际电力股份有限公司奉节发电厂, 重庆 404652)

[摘要] 目前, 我国火力发电厂汽水管道路设计标准规定, 弹簧吊架荷载变化系数不应大于 25%, 据此设计的管道系统恒力吊架比例过高, 其荷载“非法”转移会造成管道偏离设计线运行, 应力升高。分析了恒力吊架恒定度与荷载变化系数的关系并给出了优化设计案例, 研究表明, 在汽水管道路设计中适当增大弹簧吊架荷载变化系数, 可增大弹簧吊架配置占比, 减少管道膨胀异常现象的发生。

[关键词] 弹簧吊架; 荷载变化系数; 恒力吊架; 恒定度; 管道支吊架优化设计

[引用本文格式] 康豫军, 安付立, 吴晓俊, 等. 弹簧支吊架荷载变化系数的选取与汽水管道路支吊架优化设计[J]. 热力发电, 2024, 53(2): 192-198. KANG Yujun, AN Fuli, WU Xiaojun, et al. Selection of load variation factor of spring hanger and optimization design of steam/water pipe support and hanger[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(2): 192-198.

## Selection of load variation factor of spring hanger and optimization design of steam/water pipe support and hanger

KANG Yujun<sup>1</sup>, AN Fuli<sup>1</sup>, WU Xiaojun<sup>1</sup>, CHENG Yongming<sup>1</sup>, SUN Kexue<sup>2</sup>, PENG Yujun<sup>2</sup>

(1.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2.Huadian International Power Co., Ltd. Fengjie Power Plant, Chongqing 404652, China)

**Abstract:** At present, China's thermal power plant steam/water pipeline design standard stipulates that the load variation coefficient of spring hangers should not exceed 25%. Accordingly, the designed proportion of the constant support hanger is too high, and the "illegal" transfer of the load will cause the pipe operation deviates from the design line, and the stress increases. This paper analyzes the relationship between the constant degree and the load variability factor of constant hanger. The optimization design case shows that, properly increasing the load variation coefficient of spring hangers in the design of steam/water pipelines can increase the proportion of spring hanger configuration and reduce the occurrence of abnormal pipeline expansion.

**Key words:** variable spring hangers; variability factor; constant support hangers; constant degree; optimization design of pipe support and hanger

《火力发电厂汽水管道路设计规范》(DL/T 5054—2016)<sup>[1]</sup>、《发电厂汽水管道路应力计算技术规程》(DL/T 5366—2014)<sup>[2]</sup>计划将“管道由冷态到运行工况, 弹簧荷载变化系数不应大于 25%”修编为“管道由冷态到运行工况, 弹簧荷载变化系数不宜大于 25%”。

在大量计算分析和在役管道恒力弹簧支吊架

(恒力吊架)性能测量统计的基础上, “不应”修改为“不宜”将提高管道设计水平提供新的思路。

本文对恒力吊架恒定度与荷载变化系数的关系、变力弹簧支吊架(弹簧吊架)荷载变化系数的含义及在管道设计中适当增大弹簧吊架荷载变化系数的优点予以分析说明, 研究成果可为汽水管道路设计提供有益的借鉴和参考。

收稿日期: 2023-06-21

第一作者简介: 康豫军(1964), 男, 正高级工程师, 主要研究方向为管道支吊架优化设计与调整、管道振动分析、部件失效分析等, kangyujun@tpri.com.cn.

### 1 恒力吊架恒定度及其荷载变化系数

国标恒力吊架恒定度主要受载荷轴、主轴、弹簧拉杆轴等摩擦力矩及部件几何尺寸精度等的影响，恒定度是恒力吊架质量控制的关键，四连杆恒力吊架各转动轴应使用低摩擦系数的滑动轴承。对大量在役恒力吊架恒定度测量表明，国标恒力吊架恒定度大多在 8%~20%<sup>[3-4]</sup>，进口恒力吊架在 4%~10%，多数不满足 GB/T 17116.1<sup>[5]</sup>、NB/T 47038<sup>[6]</sup>中规定不大于 6%的要求。图 1 为恒力吊架位移-荷载曲线形成的迟滞回线示意。热位移向下的恒力吊架由冷态的 A 点到热态的 B 点，其荷载变化相当于有一定刚度的弹簧吊架，为分析方便，本文引入恒力吊架荷载变化系数  $\xi_c$  概念。弹簧吊架、恒力吊架荷载变化系数均指热位移引起的支吊架实际荷载变化与设计荷载的比值，但恒力吊架荷载变化并不包含在管道系统设计计算中，因此，应分析这种荷载变化对管道设计和运行的影响。

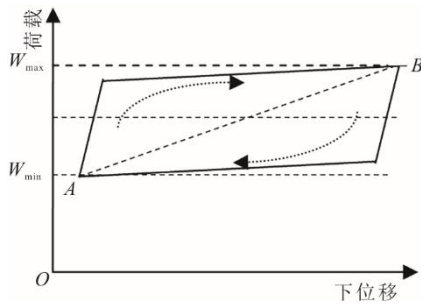


图 1 恒力吊架位移-荷载曲线

Fig.1 Displacement-load curve of constant force hanger

#### 1.1 恒定度及荷载变化系数分析

以向下位移恒力吊架为例（上位移分析类似），根据 GB/T 17116.1—2018，恒力吊架恒定度及荷载偏差度  $\lambda_c$  计算公式为式(1)和式(2)，荷载变化系数  $\xi_c$  计算公式为式(3)：

$$\Delta = \frac{W_{max} - W_{min}}{W_{max} + W_{min}} \times 100\%, \Delta \leq 60\% \quad (1)$$

$$\lambda_c = \left| \frac{W_b - W}{W_b} \right|, \lambda_c \leq 2\% \quad (2)$$

$$\xi_c = \frac{W_{max} - W_{min}}{W_b} \quad (3)$$

式中： $W_{max}$  为恒力吊架运行荷载； $W_{min}$  为恒力吊架安装荷载； $W_b$  为恒力吊架设计荷载； $W$  为恒力吊架拔销荷载，拔销荷载在图 1 迟滞回线上的某点，通常在 A、B 点之间。

图 2 为某电厂部分在役机组的恒力吊架性能测量结果。由图 2 可知，在役恒力吊架标准荷载在  $W_{max}$  和  $W_{min}$  之间。

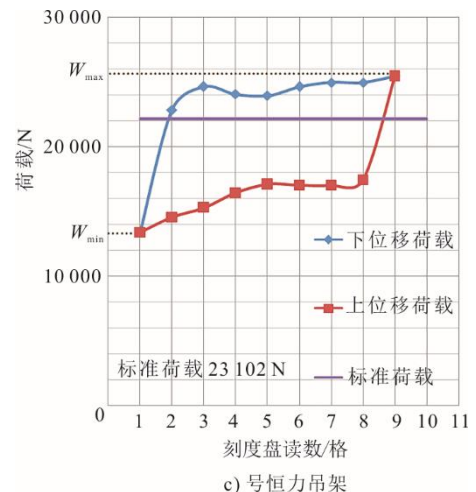
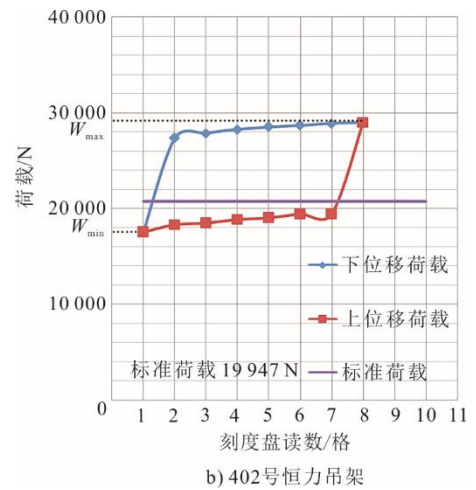
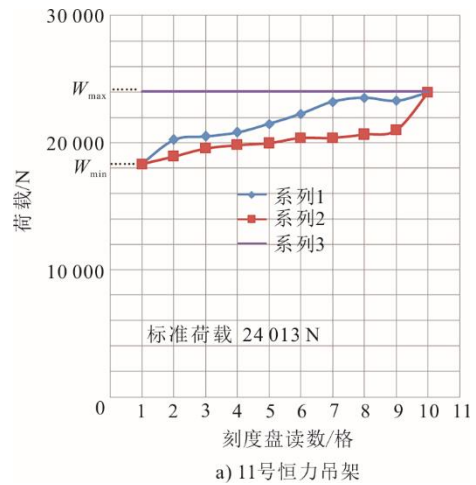


图 2 部分在役恒力吊架恒定度测量曲线

Fig.2 The constant degree measurement curves of partial in-service constant force hangers

恒力吊架设计荷载为：

$$W_b = W_{min} + k(W_{max} - W_{min}), k = 0 \sim 1 \quad (4)$$

式中： $k$ 为迟滞回线相对于恒力吊架标准荷载的位置，标准荷载在 $W_{\max}$ 和 $W_{\min}$ 之间。

恒力吊架荷载偏差度为：

$$\lambda_c = \left| \frac{W_b - W_{\min}}{W_b} \right| = \frac{k(W_{\max} - W_{\min})}{W_{\min} + k(W_{\max} - W_{\min})} \quad (5)$$

恒力吊架荷载变化系数为：

$$\xi_c = \frac{W_{\max} - W_{\min}}{W_b} = \frac{W_{\max} - W_{\min}}{W_{\min} + k(W_{\max} - W_{\min})} \quad (6)$$

以 $k$ 分别为1.0、0.5、0为例，根据式(4)、式(5)和式(6)计算恒力吊架荷载变化系数，具体见表1。由表1可见，恒力吊架荷载变化系数约为恒定度的2倍左右。

表1 恒力吊架荷载偏差、恒定度与荷载变化系数的关系  
Tab.1 The relationship between the load variability factor of constant hanger, the constant degree and variability factor

系数 $k$	荷载偏差度/%	恒定度/%	荷载变化系数/%
1.0	5.0	2.56	5.0
0.5	5.0	5.00	10.0
	10.0	10.0	20.0
0	0	6.00	12.8
	0	10.00	22.2

表2 部分恒力吊架性能测量结果

Tab.2 The test results of some constant support hangers

编号	吊架型号	标准荷载/N	设计值与最大或最小值的偏差度/%	恒定度/%	荷载变化系数/%
11	LHA32	24 013	23.7	13.4	23.5
402	LHC40	20 756	39.6	24.6	55.1
23	PHE49	22 119	39.6	31.2	54.7
208	PE37	21 753	35.1	24.5	42.2
201	PHE-55	47 939	9.7	9.1	18.4
2016	PHE-60	52 528	13.0	11.2	22.0
2026	PHE-56	88 205	17.2	17.6	35.0
BQ058	ALSTON	27 937	11.4	8.1	15.6
BQ029	ALSTON	25 917	10.8	6.7	12.8
BQ030	ALSTON	25 917	15.8	11.8	22.5

## 1.2 大量配置恒力吊架的缺点

如果汽水管道为理想化的全恒力吊架设计，则冷热态管道质量均由各吊点恒定荷载承担，管道为无质量线而自由膨胀，其二次应力较低，但总体热膨胀量大，要求恒力吊架接近绝对恒力，管道与厂房梁和柱之间要留有足够的膨胀空间。实际情况是恒力吊架质量远达不到设计要求，且布置困难、造价和维护成本高。

表2为作者工作团队对部分在役机组的恒力吊架性能测量结果。表2统计表明，恒定度在8%~20%的恒力吊架比例很高<sup>[7-9]</sup>，荷载变化系数（即冷态到热态荷载转移率）高达20%~45%，这种恒力吊架的配置比例越高累积影响越大，因此应适当减少恒力吊架的配置比例，这样可以尽可能减小恒力吊架荷载转移总量。

由以上分析可知：

1) GB/T 17116.1 附录 B.3.5 规定“恒力吊架最小最大荷载均应在工作荷载的94%~106%”，这意味着最大荷载变化系数为12%，恒力吊架的设计荷载宜在最大、最小值的中间，即 $k \approx 0.5$ 。另外，在役机组主给水管道入口联箱附近的恒力吊架宜调整为 $k \approx 1$ ，即使热态恒力吊架荷载接近设计荷载，冷态恒力吊架为最小荷载，与管内无水工况相匹配，可通过调整荷载调节螺栓实现。

2) 荷载变化系数约为恒定度的2倍左右（表1和表2），对于恒力吊架占比较高的管道，超过12%的荷载转移量对管道应力和热膨胀将产生明显影响，实测的在役国标恒力吊架恒定度大多都超过了6%<sup>[3-4,7]</sup>。

恒力吊架恒定度较大时，荷载转移到刚性吊架、弹簧吊架及汽缸等固定端，为了保持管道的几何尺寸，管道热态线必将发生变化，垂直管段上端向锅炉中心方向倾斜，管道某些区域有一定量的“下沉”，导致部分恒力吊架上位移不足或下位移指针卡在下列限位<sup>[7-9]</sup>。对于恒力吊架占比大的管道，恒力吊架恒度超标、荷载转移多是管道明显偏离冷、热态设计线的重要原因<sup>[10]</sup>，不利于管道的长

期安全运行。

过于追求管道较低的二次应力及设计简便性很可能在管道上配置大量恒力吊架,该思路限制了技术人员设计出热膨胀稳定性好、应力合格、造价和维护成本低的优良管道支吊架系统。

## 2 弹簧荷载变化系数的选取及管道优化设计

### 2.1 弹簧荷载变化系数的选取

ASME B31.1 (*Power Piping*) 建议弹簧荷载变化不超过 25%<sup>[11]</sup>,多年来我国标准规定弹簧荷载变化系数不应大于 25%。20 世纪 80 年代《火力发电厂汽水管设计技术规定》(DLGJ 23—1981) 建议弹簧荷载变化系数不超过 35%<sup>[12]</sup>,由力学原理可知,管道静力分析已计入弹簧附加力的影响<sup>[13]</sup>,强调较小的弹簧荷载变化率没有必要,也限制了管系设计的灵活性、经济性和热膨胀的准确性。苏联火电、核电常规岛汽水管有全弹簧支吊架设计的案例,其弹簧荷载变化系数大于 50%。

管道设计时弹簧热位移及荷载变化依据结构力学本构方程与管道热膨胀相匹配,应力合格即可,限制弹簧荷载变化并无结构力学依据。由于弹簧吊架结构简单,没有杠杆、转轴等装置,弹簧荷载偏差小、质量稳定,弹簧依靠其形变和荷载适配管道热膨胀,其荷载变化系数并无负面含义。由于管道力学计算未考虑恒力吊架荷载变化,管道实际热膨胀与设计存在偏差,对长期安全运行不利。对膨胀量大的管道,设计人员在管道应力分析时可选择弹簧荷载变化系数大于 25%,并结合其他技术手段可明显减少恒力吊架配置,优化设计出更好的管道支吊架系统。

### 2.2 汽水管优化设计

管道设计主要需要考虑管道应力、管道端点对

设备的推力力矩、合理分配支吊架荷载和热位移等。管道优化设计方法可考虑如下几方面:

1) 大机组机-炉跨距和垂直高差较大,总体热膨胀量大,在汽水管初步设计过程中,如果发现恒力吊架占比较大,可适当增大弹簧荷载变化系数,如弹簧荷载变化系数取 35% (35% 可对应 2 个长弹簧) 或更大;

2) 总体热膨胀量较大时可考虑适当增加弯管数量并合理布置刚性支吊架,将整个管系分为若干管段区域,将较大的膨胀量分散到更多区域,以减小每个区域的总膨胀量;

3) 在火电厂四大管道设计时应考虑滑动支架、导向支架、限位板的摩擦力及管道实际质量<sup>[14-16]</sup>等,对于非约束方向热位移稍大的刚性推拉杆,宜将推拉杆与管道一并计算,可真实反映刚性推拉杆对管道热位移的作用;

4) 端点推力力矩超标时,可通过管系应力分析,设置相应方向的限位(或给定位移限位)装置、调整附近支吊架荷载等方法调整推力力矩。

设计单位通过综合细致地优化设计,可大幅减少恒力吊架配置比例,设计出优良的管道支吊架系统,并以此为范本为经验不足的技术人员提供设计参考。

## 3 优化设计算例

以某超临界 660 MW 机组高温再热蒸汽管道为例,优化设计如下:29 号恒力吊架改为刚性吊架,5 号、6 号刚性吊架换到原 11 号、20 号吊架位置,弹簧吊架的弹簧荷载变化系数由原来的 25% 变为 35%,16 号恒力吊架的载荷由 112.796 kN 赋值为 100.000 kN。高温再热蒸汽管道支吊架优化设计前后最大二次应力见表 3。由表 3 的计算结果可知,各管种热胀二次应力范围有小幅升、降,均在合格范围内。

表 3 高温再热蒸汽管道支吊架优化设计前后最大二次应力对比

Tab.3 Comparison of maximum secondary stress before and after the optimized design of high-temperature reheated steam pipeline supports and hangers

管种/mm	最大应力点位置 (原设计/优化设计)	原设计二次应力 最大值/MPa	优化设计二次应力 最大值/MPa	原设计、优化设计二次 应力允许值/MPa	二次应力 变化/%
Φ686.0×24.5	S1/S5	93.8	78.2	234.6、232.8	-16.7
Φ983.8×33.5	S2/S6	91.3	102.3	233.2、233.2	12.0
Φ682.0×23.5	S3/S7	114.0	138.4	233.1、233.1	21.3
902 三通点	S4/S8	166.2	181.6	218.8、219.0	9.3

支吊架优化设计前后最大二次应力点位置分别见图 3 中的 S1—S8 位置。图 4 为优化设计前后

支吊架荷载,图 5 为优化设计前后支吊架垂直热位移。由于该管道是热态吊零,由图 4、图 5 可知:

优化设计后仅 29 号恒力吊架改为刚性吊架处荷载明显增大, 其他吊架荷载基本无变化; 热位移绝对值大幅减小, 达到了减少恒力吊架配置数量、提高管道热膨胀准确性和稳定性的目的。

综上所述, 在管道布置不变的情况下, 本算例

将弹簧荷载变化系数由原来的 25%变为 35%, 并调整个别刚性吊架的位置, 即可将原管道 9 组恒力吊架变更为弹簧吊架, 弹簧吊架的占比由原设计的 42.9%优化为设计后的 68.6%, 实现了配置更多弹簧吊架的设计理念。

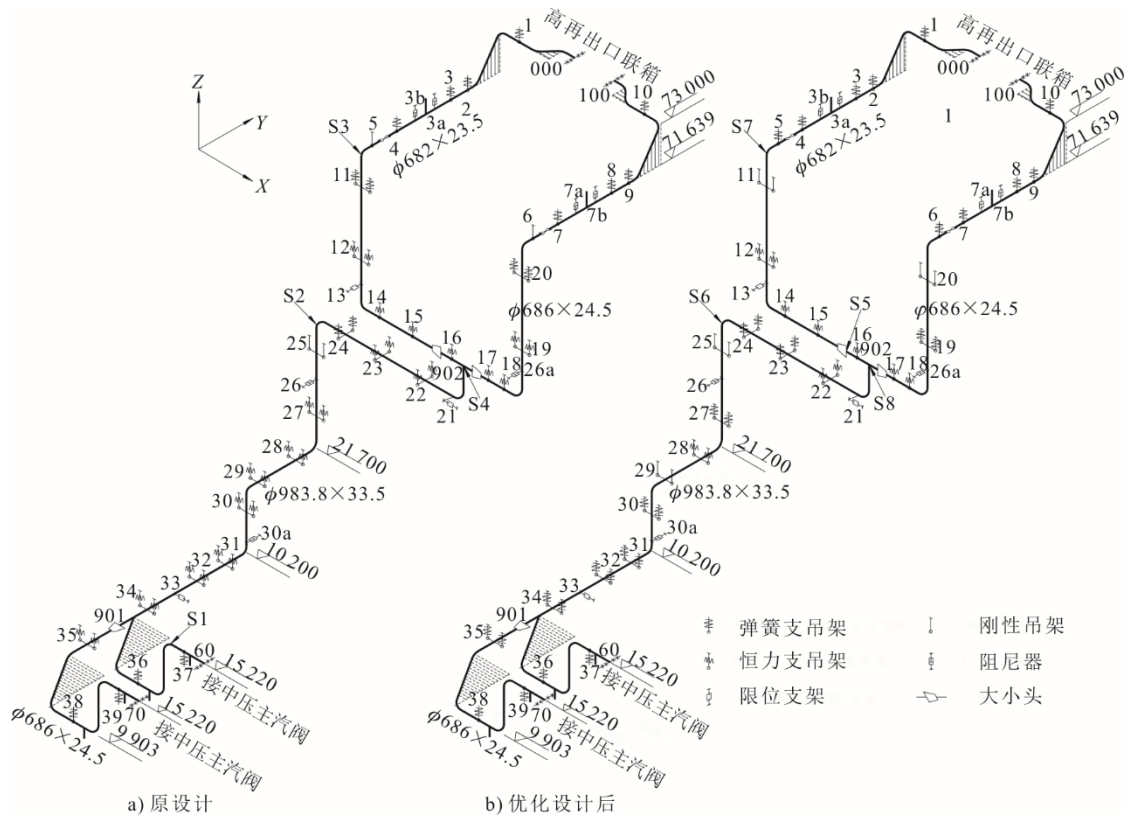


图 3 原设计管道与优化设计后管道支吊架布置示意 (mm)  
Fig.3 Schematic diagram of layout of high temperature reheat steam piping and supports and hangers before and after optimization (mm)

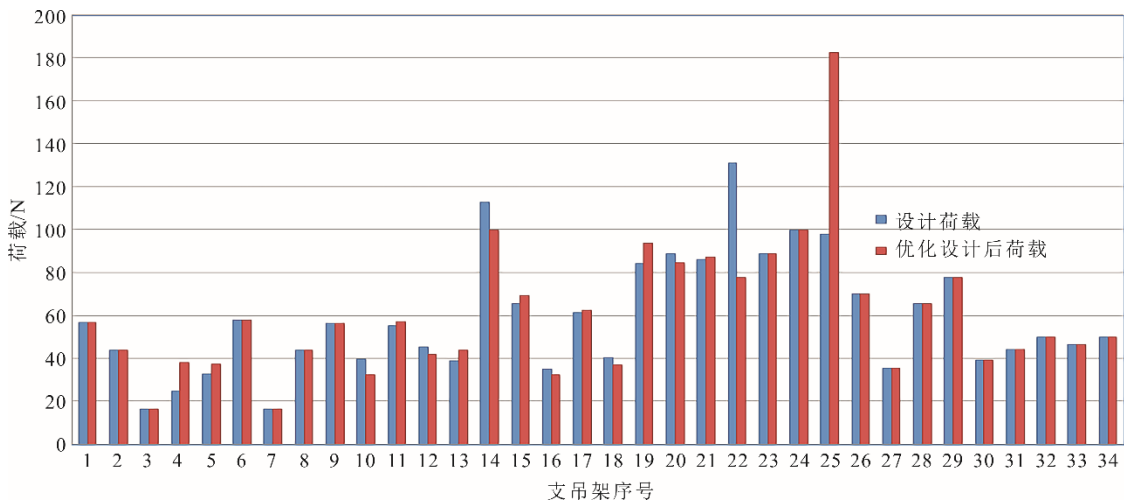


图 4 优化设计前后支吊架荷载对比  
Fig.4 Loads of the supports and hangers before and after optimization

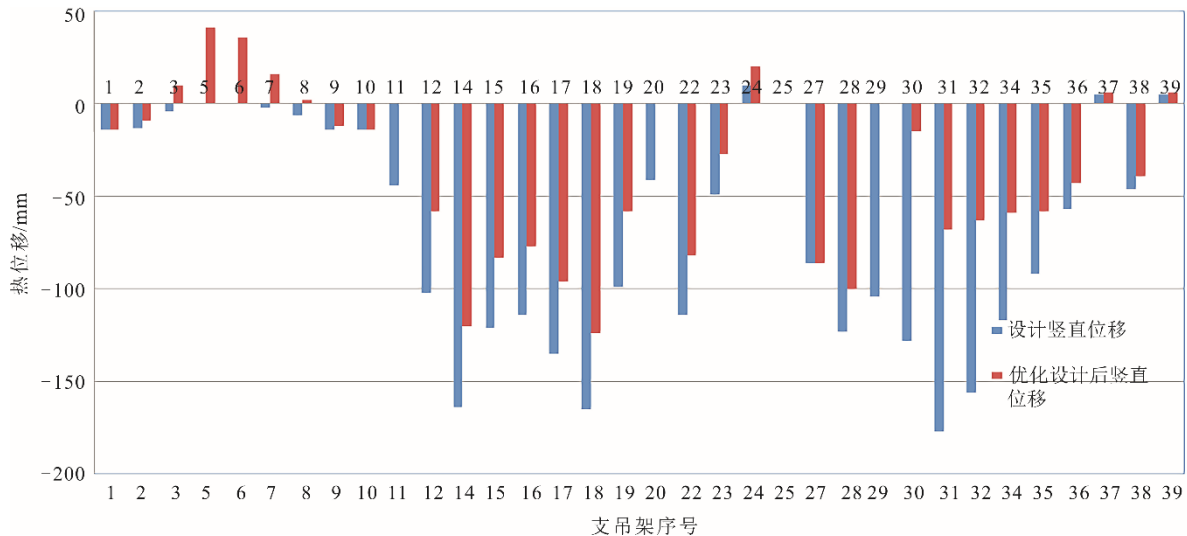


图5 优化设计前后支吊架垂直热位移对比

Fig.5 The value of hot displacement in Z direction before and after optimization

## 4 结 论

1) 计算和实测数据表明, 在役国标恒力吊架恒定度大多在 8%~20%, 荷载变化系数是恒定度的 2 倍左右, 恒力吊架恒定度超标的比例很高, 管系中恒力吊架配置比例越高累积荷载转移越大, 对管道应力和热膨胀产生显著的不利影响。恒定度是恒力吊架质量控制的关键, 国标恒力吊架(四连杆恒力吊架)各转动轴应使用低摩擦系数的滑动轴承。

2) 管道设计时弹簧位移-荷载变化由结构力学本构方程决定, 与管道热膨胀相匹配, 弹簧荷载变化系数并无负面含义, 管系应力合格即可, 限制弹簧荷载变化系数并无结构力学依据。恒力吊架荷载变化在管道计算中并未考虑, 恒力吊架占比较高时其荷载转移对管道的热膨胀和应力影响显著。

3) 受国外标准影响, 我国标准中弹簧吊架荷载转移系数长期限制在 25% 内, 对大机组管道热膨胀的准确性、稳定性不利。管道优化设计, 需考虑刚性吊架和弯管布置, 将较大的膨胀量分散到更多区域, 可将弹簧吊架荷载变化系数放宽到 35% 或更大, 以减少恒力吊架配置比例, 提高结构简单、荷载偏差小、性能稳定的弹簧吊架的占比。

### [参 考 文 献]

[1] 火力发电厂汽水管道路设计规范: DL/T 5054—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016: 109.  
Code for design of steam/water piping of fossil-fired power plant: DL/T 5354—2016[S]. Beijing: China Planning Press, 2016:109.

[2] 发电厂汽水管道路应力计算技术规程: DL/T 5366—

2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014: 99.  
Technical code for stress calculating of steam/water piping in power plant: DL/T 5366—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014: 99.

[3] 王军民, 邓玲惠, 吴晓俊, 等. 低温再热器入口管道线状偏离机理分析[J]. 热力发电, 2019, 48(10): 105-110.  
WANG Junmin, DENG Linghui, WU Xiaojun, et al. Mechanism research on linear deviation of low temperature reheater inlet piping[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(10): 105-110.

[4] 陈盛广, 王军民, 邓玲惠, 等. 高温再热蒸汽管道异常位移产生原因及防治研究与应用[J]. 热力发电, 2022, 51(5): 169-174.  
CHEN Shengguang, WANG Junmin, DENG Linghui, et al. Cause analysis on abnormal displacement of high temperature reheat steam pipeline and the prevention research and application[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(5): 169-174.

[5] 管道支吊架第 1 部分: 技术规范: GB/T 17116.1—2018[S]. 北京: 中国质检出版社, 2018: 19-20.  
Pipe supports and hangers: part 1: technical specification: GB/T 17116.1—2018[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2018: 19-20.

[6] 恒力弹簧支吊架: NB/T 47038—2019[S]. 北京: 新华出版社, 2019:75.  
Constant spring support and hanger: NB/T 47038—2019[S]. Beijing: Xinhua Press, 2019:75.

[7] 康豫军, 姚军武, 王必宁, 等. 恒力吊架荷载离差对管系热位移影响的研究[J]. 热力发电, 2009, 38(5): 72-76.  
KANG Yujun, YAO Junwu, WANG Bining, et al. Study on the influence of load deviation in constant-forced hanging bracket upon piping's thermal displacement[J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(5): 72-76.

[8] 刘明, 郭延军, 何贵宽, 等. 火电厂汽水管道路热胀位移异常综合评估及处理[J]. 理化检验(物理分册), 2018, 54(4): 256-261.  
LIU Ming, GUO Yanjun, HE Guikuan, et al. Comprehensive assessment and treatment on abnormal thermal expansion displacement of steam and water pipelines of thermal power plants[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2018,

- 54(4): 256-261.
- [9] 冯亦武, 杨昆山, 景岗呈. 某电厂主蒸汽管道下沉原因分析及治理措施[J]. 东北电力技术, 2020, 41(5): 10-13.  
FENG Yiwu, YANG Kunshan, JING Gangcheng. Research on cause analysis and treatment measure of main steam pipe sinking in thermal power plant[J]. Northeast Electric Power Technology, 2020, 41(5): 10-13.
- [10] 张伟江, 卫大为, 吴晓俊, 等. 某火电厂 1 000 MW 机组高温再热蒸汽管道热位移异常原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2013, 49(7): 432-434.  
ZHANG Weijiang, WEI Dawei, WU Xiaojun, et al. Cause analysis on abnormal thermal displacement of high temperature reheat steam pipelines of 1 000 MW units in power plant[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2013, 49(7): 432-434.
- [11] Power Piping: ASME B31.1—2022[S]. New York: ASME B31 Committee, 2022: 56.
- [12] 火力发电厂汽水管道设计技术规定: DLGJ 23—1981[S]. 北京: 电力工业出版社, 1981: 60.  
Code for design of steam/water piping of fossil-fired power plant: DLGJ 23—1981[S]. Beijing: Electric Power Industry Press, 1981: 60.
- [13] 林其略, 周美芳. 管道支吊技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社 1994: 74.
- LIN Qilüe, ZHOU Meifang. Piping supports and hangers technique[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1994: 74.
- [14] 程勇明, 马红, 王军民, 等. 大口径高温高压管道下沉分析[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(9): 58-60.  
CHENG Yongming, MA Hong, WANG Junmin, et al. Analysis of large caliber high temperature and high pressure pipe subsidence[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2016, 42(9): 58-60.
- [15] 刘宾, 王军民, 安付力, 等. 恒力吊架力学性能对低温再热蒸汽管道热位移的影响[J]. 理化检验(物理分册), 2013, 49(4): 244-259.  
LIU Bin, WANG Junmin, AN Fuli, et al. Effects of mechanical properties of constant force hangers on thermal displacement to flow-temperature steam pipes[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2013, 49(4): 244-259.
- [16] 王彪, 唐远富, 秦旭明, 等. 某电厂高温再热蒸汽管道下沉原因分析及治理[J]. 湖南电力, 2020, 40(2): 33-36.  
WANG Biao, TANG Yuanfu, QIN Xuming, et al. Cause analysis and treatment for sinking of high temperature reheat steam pipeline in a power plant[J]. Hunan Electric Power, 2020, 40(2): 33-36.

(责任编辑 邓玲惠)

## 广告目次

《热力发电》 .....	封三
南京常荣声学股份有限公司 .....	后彩插 1
西安热工研究院有限公司 .....	后彩插 2—5
国核自仪系统工程有限公司 .....	后彩插 6