

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.01.010

火电厂主要蒸汽管道压降算法研究

孙张伟

(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: 为了解决管道压降计算的准确性问题, 基于对前苏联、德国、美国的管道压降算法进行比对分析, 结合火电厂主要蒸汽管道的特点和性能试验数据, 提出了一种优化和精确的蒸汽管道压降的算法。新的算法消除了先前算法由于试验条件、理论计算、制造工艺等的不同对于结果的偏差, 对主要蒸汽管道的系统、布置的优化提供了更为有效的途径。

关键词: 主蒸汽管道; 压降; 算法; 性能

中图分类号: TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)01-0063-05

Research on Calculation of Pressure Drop in Major Steam Pipe of Thermal Power Plant

SUN Zhangwei

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

Abstract: In order to solve the problem of pipeline pressure drop calculation accuracy, in this paper, based on comparison to the analysis algorithms of pipeline pressure drop in Soviet Union, Germany and U. S., combined with characteristics and performance of major steam piping in thermal power plant, an optimized and accurate algorithm of steam pipe pressure drop was proposed. The new algorithm eliminated deviation of the results in previous algorithm because of the difference of test conditions, theoretical calculations, manufacturing processes. New pipeline pressure drop algorithm for thermal power plant major steam piping provides a more effective way to optimize of layout and process of major pipeline.

Key words: performance; main steam pipe; pressure drop; algorithms

参与海外或总承包项目设计时, 火力发电机组的性能保证值是项目投标以及实施的核心技术指标。主要蒸汽管道(主蒸汽和再热蒸汽管道)的压降是火力发电厂中除了主机本体性能外, 最重要的性能指标。该压降指标除了影响机组运行经济性, 还影响主蒸汽和再热蒸汽管道的初投资。如何在项目实施前期精确地计算主蒸汽和再热蒸汽管道压降, 合理地平衡初投资和机组性能, 从而选择出最优的管道规格, 对项目实施的成功与否影响巨大。

火电厂主要蒸汽管道压降受到管道布置、管道类型(内径管或外径管)、管件类型(T型三通或Y型三通、弯头或弯管等)、介质流速、制造工艺、

现场施工焊接质量等诸多因素的影响, 很难从理论上得到精确的推导公式。欧美等发达国家(主要是前苏联, 德国, 美国)在上世纪本国火电发展的高峰期, 基于理论分析及相关试验, 得到了一些经验性的计算公式。由于理论分析的思路, 试验方法, 管道加工工艺水平的不同, 其计算结果也存在较大差异。而国内在此领域, 没有相关的深入研究, 只是在规范中摘录、节选了相关国家的压降计算规定。

本文对国外规范及手册中主要蒸汽管道压降的算法进行了分析比较, 得到优化的蒸汽管道压降算法, 以此为基础结合火电厂管道压降性能实测数据, 对算法进行验算和修正, 更有利于工程实践中对火电厂主要蒸汽管道压降的精确计算。

1 主蒸汽和再热蒸汽管道压降的算法理论

伯努利方程 (Bernoulli's equation) 是理想流体定常流动的动力学方程。产生流动阻力和能量损失的根源是流体的粘性和紊动。流动阻力分为沿程阻力 (Frictional Drag) 和局部阻力 (Local Resistance)。流段两截面间的水头损失为两截面间所有沿程损失和所有局部损失总和。

对于工程领域的管道而言, 计算沿程阻力公式为圆管流的达西-魏斯巴赫公式 (Darcy-Weisbach Formula):

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

式中: h_f 为沿程阻力, m; $\frac{l}{d}$ 为几何因子 (l 为介质流经的管道长度, m; d 为介质流经的管道内径, m); $\frac{v^2}{2g}$ 为速度水头 (v 为管内平均速度, m/s; g 为重力加速度, m/s^2); λ 为沿程摩擦系数 (λ 由实验确定, λ 与雷诺数和管壁相对粗糙度有关)。

达西公式为不可压缩粘性流体在粗糙管内定常流动时, 沿管道的压强降表达式, 对层流、紊流均适用。该式适用于任何截面形状光滑或粗糙管内充分发展的层流和湍流流动, 在工程上有重要意义。结合到燃煤火力发电机组的主蒸汽管道、再热蒸汽管道, 达西公式依然适用于计算沿程阻力。

对于局部阻力的计算, 由于涉及到局部几何形体的差异, 会有不同的局部阻力计算公式。对于火力发电厂主要蒸汽管道而言, 圆管管道中圆管突然扩大的局部损失, 根据式(1)的推算, 得到公式(2):

$$h_j = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} \quad (2)$$

式中: h_j 为沿程阻力, m。

上式即为圆管突然扩大局部损失的计算公式, 称波达 (Borda) 公式。

在实际工程中, 对于多数其它形式的局部水头损失, 还不能得到理论公式, 一般都采用式(3)的通用公式:

$$h_j = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

式中: ξ 为局部阻力系数。

式(3)中的局部阻力系数数据则需要查阅水力学手册。

基于式(3)的思路, 将管道中的局部损失按沿程损失计算, 即把局部损失折合成具有同一沿程损失的管段, 这个管段的长度称为“等值长度”, 使得工程中各种局部阻力的计算公式就简化为局部阻力系数的确定。这个“等值长度”概念非常方便进行工程化应用, 只要对典型几何模型, 进行相关的局部阻力数值模型和物理模型验证, 得到“等值长度”, 在工程实践中, 就可以简单地查阅手册进行精确的局部阻力计算, 这也是本文主要蒸汽管道压降优化算法的思路。

对于火力发电厂中主要蒸汽管道的压降而言, 性能试验时是考虑点对点的压降。管道系统的连接方式主要为图1中A或B所示, 不存在图1中C所示的连接方式, 因此管路系统层面上的分支管道总压降(等同于电路系统中电阻的串并联问题)计算问题是不存在的。

图1所示的管路系统分支管道的总压降的存在前提是1、2点处有同样的压力数值。对于火力发电厂中主蒸汽管道、再热蒸汽管道而言, 在设计时, 其分支管的规格是相同的, 布置上基本对称, 所以流量也基本相同。由于管道压降的绝对数值均较小, 分支管道压降差异不会对管内介质流量造成较大的影响。

综上所述, 结合火力发电厂中主要蒸汽管道的布置及压降性能试验情况, 压降计算中, 无需考虑管路系统层面上的分支管道总压降问题。因此, 结

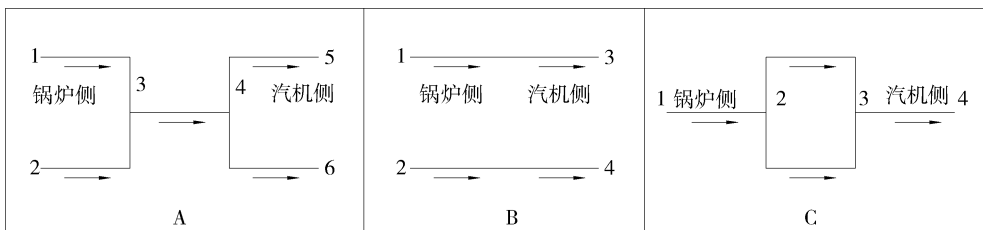


图1 蒸汽管道连接方式的比较

Fig. 1 Comparison of steam pipeline connection

合式(1)、式(2)、式(3)，压降算法的问题转化为下列3个具体问题：

- 1) 沿程阻力的计算。
- 2) 管道的等值粗糙度的确定。
- 3) 主要管件的局部阻力的计算(弯头、三通、大小头等)。

2 主蒸汽和再热蒸汽管道压降算法的研究现状

2.1 前苏联管道压降算法

2.1.1 管道的等值粗糙度

管道的等值粗糙度如表1所示。

表1 前苏联推荐的等值粗糙度^[1]

Tab. 1 Recommended equivalent roughness in Pre-Soviet Union

| 管道类型 | 等值粗糙度/mm |
|------|----------|
| 无缝钢管 | 0.2 |
| 焊接钢管 | 0.3 |

注：表中数据基于等值粗糙度 0.2 mm，弯曲半径与管道直径的比值为 1.5。

2.1.2 沿程阻力的计算

沿程阻力的计算与式(1)的达西公式一致，只是规定式(1)中的 l 为包括管件等展开长度后的全部管道的总长度。

2.1.3 局部阻力的计算

局部阻力系数按照不同的管件，取用不同的公式。如弯头的局部阻力系数表如表2所示。

表2 前苏联推荐的热压弯头局部阻力系数^[1]

Tab. 2 Recommended hot resistance elbow local resistance coefficient in Pre-Soviet Union

| 弯头角度 | 局部阻力系数 |
|------|--------|
| 90° | 0.25 |
| 60° | 0.20 |
| 45° | 0.18 |

2.2 德国管道压降算法

2.2.1 管道的等值粗糙度

管道的等值粗糙度如表3所示。

2.2.2 沿程阻力的计算

沿程阻力计算与式(1)的达西公式一致，只是规定式(1)中 l 为扣除管件等长度后的直管段总长度。

表3 德国推荐的等值粗糙度^[2]

Tab. 3 Recommended equivalent roughness in Germany

| 管道类型 | 等值粗糙度/mm |
|-----------|-----------|
| 无缝钢管(未酸洗) | 0.02~0.06 |
| 无缝钢管(已酸洗) | 0.03~0.04 |
| 焊接钢管 | 0.04~0.10 |

2.2.3 局部阻力的计算

局部阻力系数为管件的全部阻力系统，包括了沿程阻力和局部阻力。按照不同的管件，取用不同的公式。如弯头的阻力系数表如表4所示。

表4 德国推荐的热压弯头阻力系数^[2]

Tab. 4 Recommended hot resistance elbow local resistance coefficient in Germany

| 弯头角度 | 阻力系数 |
|------|------|
| 90° | 0.14 |
| 60° | 0.12 |
| 45° | 0.09 |

注：弯曲变径与管道直径的比值为 2。

2.3 美国管道压降算法

2.3.1 管道的等值粗糙度

管道的等值粗糙度如表5所示。

表5 美国推荐的等值粗糙度^[3]

Tab. 5 Recommended equivalent roughness in U. S.

| 管道类型 | 等值粗糙度/mm |
|--------|----------|
| 普通商业钢管 | 0.05 |

2.3.2 沿程阻力的计算

沿程阻力计算与式(1)达西公式一致，只是规定式(1)中 l 为扣除管件等长度后的直管段总长度。

2.3.3 局部阻力的计算

局部阻力系数为管件的全部阻力系统，包括了沿程阻力和局部阻力。按照不同的管件，取用不同的公式。如弯头的阻力系数如表6所示。

表6 美国推荐的热压弯头阻力系数^[3]

Tab. 6 Recommended hot resistance elbow local resistance coefficient in U. S.

| 弯头角度 | 阻力系数 |
|------|---------|
| 90° | $14f_T$ |

注：弯曲变径与管道直径的比值为 1.5， f_T 为管件的当量长度。

对于非 90°弯头，计算式如式(4)所示：

$$K_B = (n - 1)(0.25\pi f_T \frac{r}{d} + 0.5K) + K \quad (4)$$

式中： n 为90°弯头的数量； K 为1个90°弯头的等效长度； K_B 为非90°弯头的阻力系数； r 为弯头的弯曲半径，m； d 为弯头的截面内径，m。

2.4 国内规范管道压降算法

在《火力发电厂汽水管道设计规范》(DL/T 5054—2016)的附录D中，提供了前苏联、美国的压降算法及等值粗糙度和德国推荐的等值粗糙度^[4]。在《电厂动力管道设计规范》GB 50764—2012压降计算的章节，仍然是基于前苏联算法和美国推荐的管道等值粗糙度组合进行计算^[5]。

3 主蒸汽、再热蒸汽管道压降算法的比较

国外规范的压降算法自身是一个完整的体系，在进行压降计算时，应进行有效的比对分析，不能对体系进行相互的交叉使用，否则计算结果会有很大的偏差。如在美国的压降算法体系中，管件、阀门等附属件等效长度均为包含了沿程阻力和局部阻力在内的总阻力，如果套用前苏联计算沿程阻力公式，则会出现所有管件、阀门等附属件的沿程阻力计算了两次，造成数据的偏差。

另外，有些等值粗糙度的英文原始含义有待进行深入研究，否则易出现理解偏差。如在美国Crane Valve手册中，列举管道的等值粗糙度时，原文“Drawn tubing”含义是玻璃等非常光滑的管道，而在《火力发电厂汽水管道设计技术规定》，将“Drawn tubing”认为是冷拔钢管(新的、洁净的)。即“Drawn tubing”所对应的 1.5×10^{-3} mm等值粗糙度，不能应用于火力发电厂中主要蒸汽管道的压降计算。

3.1 沿程阻力的计算比较

火电厂主要蒸汽管道压降计算式，沿程阻力计算的最佳方法就是达西公式，而相关管道摩擦系数的确定也基于热力学图表，无本质上的不同。如表7所示，在相同条件下，使用3个国家的规范，计算出的管道摩擦系数也基本一致。

表7 国外管道沿程阻力算法比较

Tab. 7 Comparison of pipeline frictional drag algorithm of foreign

| 国家 | 算法 | 管道摩擦系数的确定 | 是否考虑* |
|-----|------|-----------|-------|
| 前苏联 | 达西公式 | 图表 | 是 |
| 德国 | 达西公式 | 图表+公式 | 否 |
| 美国 | 达西公式 | 图表 | 否 |

注：* 是否需要考虑管件等展开长度的沿程阻力。

3.2 等值粗糙度的数据比较

根据主蒸汽、高温再热蒸汽管道、低温再热蒸汽管道的特点，按照内径管道(主蒸汽管道、高温再热蒸汽管道，即内径无缝钢管)和外径管道(低温再热蒸汽管道，即外径焊制钢管)分别考虑管道等值粗糙度的数据。

根据对比，德国规范和美国规范均基于试验基础，同时参考了工程实践经验，因此数据较为准确。虽然美国Crane Valve公司进行的相关试验只是做到了DN 600口径，但是对于口径大于DN 600的管道，此数据依然适用(口径越大，管道的摩擦系数会越小)。

对于外径管道(冷段用焊制钢管)，等值粗糙度具体数量级在0.04~0.10 mm之间。考虑规范中试验年代为上个世纪80年代末期，焊制钢管的加工工艺水平低于现在水平；同时冷段用材料A672及A691材料外径偏差均低于当年做试验用低压管道的外径偏差；加上酸洗对于管道等值粗糙度的影响，外径管道(冷段用焊制钢管)的等值粗糙度应该在0.04~0.06 mm之间。

对于内径管道(主蒸汽管道、高温再热蒸汽管道，无缝钢管)，等值粗糙度具体数量在0.02~0.06 mm之间。考虑规范中试验的年代为80年代末期，无缝钢管的加工工艺水平低于现在的水平；同时管道均为内径管，内径偏差等均低于当年做试验用低压管道的“等效”内径偏差(从外径偏差推算内径偏差)；加上酸洗对于管道等值粗糙度的影响，内径管道(主蒸汽管道、高温再热蒸汽管道，无缝钢管)的等值粗糙度应该在0.02~0.04 mm之间。

3.3 管件等效阻力的数据

对于典型管件的阻力进行核算，弯头的阻力数值计算结果进行比对，如表8所示。

表8 90°弯头等效阻力比对

Tab. 8 Comparison of equivalent resistance of 90° elbow

| 国家 | 总阻力系数 | 沿程阻力系数 | 局部阻力系数 |
|-----|-------|--------|--------|
| 前苏联 | 0.270 | 0.020 | 0.250 |
| 德国 | 0.175 | — | — |
| 美国 | 0.144 | — | — |

从比对结果看，前苏联手册提供的管件压降计算结果要远大于德国、美国手册提供的管件压降计算结果。即前苏联管件的压降数值太大，不适用于

现有工程。

为了比对算法的差异，须确保在同样的边界条件下(同样的等值粗糙度 0.03 mm 前提，同样的 1.5 倍 r/d 弯头)。

由于前苏联手册中各个管件局部阻力计算都是基于等值粗糙度 0.2 mm 进行计算，无法反映其真实的管件等效数值，因此为了比对方便，将等值粗糙度从 0.2 mm 折算到 0.03 mm 进行管件局部阻力比对。考虑美国公式算法的简单性，在其算法基础上，按照比对数据平均值对其管件等附属件的等效长度进行修正和补充(考虑现场施工偏差等，所以取平均值作为基准数据)。另外，各种偏差耦合因素在最后总的压降数据中按照规范加上 5% 的裕量，结合具体工程要求而定。折算后的结果比对如表 9 所示。

表 9 边界条件相同的 90°弯头等效阻力比对

Tab. 9 Comparison of equivalent resistance of 90°elbow in same conditions

| 国家 | 总阻力系数 | 沿程阻力系数 | 局部阻力系数 |
|-----|-------|--------|--------|
| 前苏联 | 0.187 | 0.013 | 0.174 |
| 德国 | 0.175 | — | — |
| 美国 | 0.144 | — | — |

从折算后的结果比对，前苏联、德国、美国的算法结果已经接近。这也从侧面验证前苏联管道等值粗糙度的数据是偏大很多。因此，90°弯头的等效长度需要从 14λ 修正为 16.5λ 。

综上，新修正后的常见管件等效长度如表 10 所示。

表 10 优化后的管件的等效长度

Tab. 10 The optimized equivalent length of pipe

| 管件类型 | 等效长度 |
|---------------|---------------|
| 90°弯头 | 16.5λ |
| 60°弯头 | 13.5λ |
| 45°弯头 | 11.5λ |
| 30°弯头 | 8λ |
| 主流不变的等径三通 | 20λ |
| 主流改变的等径三通 | 90λ |
| 主流方向上的 45°斜三通 | 14λ |
| 支流方向上的 45°斜三通 | 42λ |

3.4 修正算法理论计算与实测值的比对

基于国内某典型 1 GW 超超临界机组再热段压

降，按照本文的修正优化算法进行核算。同时，分别列举 2 台机组的实测数据，以消除测量误差的影响。其中，锅炉厂再热器的压降 0.19 MPa，再热段压降为 0.400 7 MPa(#1 机组)，0.392 4 MPa(#2 机组)。对比表如表 11 所示。

表 11 优化后的理论计算压降与实测数据比较

Tab. 11 Comparison between the optimized theoretical pressure drop and the measured data

| 等值粗糙度 | 内径管/mm | 外径管/mm | 压降/MPa | #1 偏差/% | #2 偏差/% |
|-------|---------|---------|--------|---------|---------|
| 苏联 | 0.2 | 0.3 | 0.51 | +27.28 | +29.97 |
| 德国 | 0.02 | 0.04 | 0.401 | +0.07 | +2.19 |
| 美国 | 0.05 | 0.05 | 0.426 | +6.31 | +8.56 |
| 国内规范 | 0.001 5 | 0.045 7 | 0.365 | -8.91 | -6.98 |
| 优化值 1 | 0.025 | 0.045 | 0.408 | +1.82 | +3.98 |
| 优化值 2 | 0.03 | 0.05 | 0.414 | +3.31 | +5.50 |

结合上文中的等值粗糙度范围，内径管道等值粗糙度宜在 0.02 ~ 0.03 mm 之间取值，外径管等值粗糙度在 0.04 ~ 0.05 mm 之间取值，与真实的性能考核数据较为接近。

如果作为性能评估初次计算时，考虑内径管的加工精度较高，建议内径管道的等值粗糙度取 0.025 mm；考虑焊管的加工精度较低，外径管的等值粗糙度取 0.045 mm，总的压降裕量取 5%。

此外，如果四大管道中内径管确定采用德国曼内斯曼的机加工内径管时，内径管的等值粗糙度可以取 0.02 mm，按照下限取值。

4 结论

本研究基于水力学理论，结合国外相关的压降算法，并根据相关工程的实际性能试验数据，结合目前管材、管件等不同制造加工工艺水平，提出一套适用于火电厂主要蒸汽管道(主蒸汽、再热蒸汽管道)压降数据选择和数值计算方法。内径管道的等值粗糙度取 0.025 mm，外径管的等值粗糙度取 0.045 mm，基于修正后的管件“等效长度”，得到较为精确的主蒸汽、再热蒸汽管道压降结果。与原算法相比，优化算法更为易用和精确。新的管道压降算法对于火电厂主要蒸汽管道系统和布置优化提供了更为有效的途径，对于项目前期，合理地平衡火电厂主要蒸汽管道初投资与性能也有较强的指导意义。

(下转第 72 页 Continued on Page 72)

止回阀和电动隔离阀之间靠近下游阀门处需设置放水。所有疏水必须单独接入凝汽器或汽轮机本体疏水扩容器,不允许采用合并或转注的布置形式^[5]。

2.6 由汽轮机回热抽汽管道引出的蒸汽管道布置要求

汽轮机轴封用汽和辅助设备驱动汽轮机用汽,都是由汽轮机抽汽系统供给,这两种用汽管道布置时在抽汽管道上的引出点,应位于抽汽管道垂直管段或水平管段的顶部,不允许由抽汽管道水平管段的底部或水平管段水平接出,以防止汽轮机抽汽管道中的积水沿这些管道进入汽轮机轴封或辅助设备驱动用汽轮机,造成主汽轮机或辅助设备驱动用汽轮机进水事故^[6]。

3 结论

1) 汽轮机回热抽汽系统设计必须遵循合理的设计流程,否则会造成设计不合理、设计遗漏或存在安全隐患等诸多问题。

2) 汽轮机抽汽系统管道与汽轮机直接相连,系统设计和管道布置必须满足汽轮机防进水和防超速要求,若设计考虑不周则会引起汽轮机超速或汽轮机进水等恶性事故。

参考文献:

- [1] The American Society of Mechanical Engineers. Prevention of water damage to steam turbines used for electric power generation: fossil-fueled plants asme: ASME TDP-1-2013 [S]. New

(上接第 67 页 Continued from Page 67)

参考文献:

- [1] 尼基季娜. 火力发电厂管道手册 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [2] THBOHN K. KNOCH F. 热力工程计算图册 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [3] VALVE C. Flow of fluids through valves, fittings and pipe [M]. New York: Crane Co, 1982.
- [4] 国家能源局. 火力发电厂汽水管道设计规范: DL/T 5054—2016 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- National Energy Administration. Code for design of steam/water piping of fossil-fired power plant: DL/T 5054—2016 [S]. Beijing: China Planning Press, 2016.
- [5] 国家能源局. 电厂动力管道设计规范: GB 50764—2012 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.

York: Two Park Avenue, 2013.

- [2] Heat Exchange Institute. Standards for closed feedwater heaters: HEI 2622-2009 [S]. Ohio: Heat Exchange Institute 1 300 Summer Avenue Cleveland, 2009.
- [3] 孟杰. 一起发电机跳闸导致汽轮机超速事故的分析 [J]. 电力安全技术, 2007, 9(11): 10-11.
- MENG J. Accident analysis of a turbine overspeed due to generator out of service [J]. Electric Safety Technology, 2007, 9(11): 10-11.
- [4] 吴志刚, 孟临潼. 210 MW 汽轮机大轴弯曲原因分析及直轴方法 [J]. 广东电力, 2007, 20(12): 51-54.
- WU Z G, MENG L T. Analysis of main shaft bending of a 210 MW steam turbine and shaft straightening method [J]. Guangdong Electric Power, 2007, 20(12): 51-54.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 电厂动力管道设计规范: GB 50764—2012 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [6] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 火力发电厂汽轮机防进水和冷蒸汽导则: DL/T 834—2003 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

作者简介:



HUANG T

黄涛(通信作者)

1963-, 男, 吉林扶余人, 教授级高级工程师, 学士, 主要从事电力热力系统及安装设计研究工作 (e-mail) huangtao@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)

National Energy Administration. Design code of power piping for power plant: GB 50764—2012 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012.

作者简介:



SUN Z W

孙张伟(通信作者)

1981-, 男, 河南郑州人, 高级工程师, 硕士, 主要从事火电厂热机专业的设计和研究工作 (e-mail) sunzhangwei@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)