

基于价值工程的热机设备选型方法分析及实践

邹罗明[✉], 秦殿山, 宗纪州

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的] 传统设计工程中, 热机辅机设备设计选型存在两种倾向, 一是以功能为先, 忽视成本; 二是以低成本为准, 忽略部分功能的重要性。这两种选型方式都存在一定的缺陷, 不能实现功能与成本的统筹, 不能获取收益最大化。随着行业发展, 设计工程热机设备选型越来越重视性价比, 即以合理的成本实现最佳的功能。[方法] 将价值工程理论应用于热机设备选型, 通过价值系数公式, 统一考虑功能与成本, 实现热机设备选型方案的最优选择。[结果] 结合实际案例, 文章论证了价值工程理论应用于热机设备选型的可行性。[结论] 为后续电厂在设计设备选型过程中实现设备的功能与成本统一论证提供了一种可行方法。

关键词: 辅机选型; 价值工程; 价值系数; 功能系数; 成本系数

中图分类号: TM611; TK1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)S2-0018-06

开放科学(资源服务)二维码:



Method Analysis and Practice of Heat Engine Equipment Selection Based on Value Engineering

ZOU Luoming[✉], QIN Dianshan, ZONG Jizhou

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

Abstract: [Introduction] In traditional design engineering, there are two trends in the design and selection of auxiliary equipment of heat engine. One is to put function first and ignore cost; the other is to take low cost as the criterion and ignore the importance of some functions. Both of these two selection methods have certain defects, and the function and cost cannot be considered as a whole to maximize the benefits. With the development of the industry, an increasing emphasis is placed on the cost performance in the process of heat engine equipment selection in design engineering so as to achieve the best function at a reasonable cost. [Method] In this paper, the theory of value engineering was applied to the design and selection of heat engine equipment, and the function and cost were considered in a unified manner through the formula of value coefficient, so as to realize the optimal heat engine equipment selection scheme. [Result] Combined with practical cases, this paper has demonstrated the feasibility of applying the theory of value engineering to the selection of heat engine equipment. [Conclusion] The paper provides a feasible method for realizing the unified demonstration of equipment function and cost in the heat engine equipment selection process of the subsequent power plant design.

Key words: auxiliary engine selection; value engineering; value coefficient; function coefficient; cost coefficient

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

价值工程(Value Engineering, VE), 是一门经济和技术结合起来的现代管理科学, 是旨在聚焦于分析产品功能作用, 实现增加产品价值, 达到在合理成品下完成所需功能, 以实现功能与成品的统一^[1]。

价值工程理论主要应用于两个领域: 一是新产品研发领域; 二是产品制造领域或作业领域^[2]。在发电项目成本控制过程中热机设备选型方面的应用鲜有论述。

在发电项目成本控制中, 热机设备设计选型占项目成本比重较大, 如何在满足相应规范及功能的

前提下, 实现热力设备及管道成本最优是对设计的重要考验。

文章首次以价值工程理论为基础, 对热机设备的选型设计进行功能与成本的综合分析, 并加以统一, 以实现有优价值。

1 价值工程的原理

价值工程的提出, 其首要解决的问题就是统一产品的价值和成品, 以适合的成品实现必要的功能。价值和功能, 成品之间的关系应为如下公式^[3-5]:

$$V = F/C \quad (1)$$

式中:

V —— 价值;

F —— 功能;

C —— 成本。

功能属于技术指标, 成本则属于经济指标, 价值工程可通过功能成本的分析, 将技术问题和经济问题紧密结合起来, 从技术、经济这两方面来提高产品的价值。功能分析是价值工程的核心要点^[6]。通过准确的分析其功能及其所要付出的成本, 达到功能价值的成本的统一, 以实现最合理成本下功能效益的最大化。

价值工程的目的是实现产品的最合理价值, 而此价值是达到成本一定功能与所付出成本之比。如公式(1)所示, 实现价值最大化需要从提高产品功能属性及减低成本属性两个方面入手。提高功能属性并非一味追求高功能, 而是应该实现功能合理化, 根据实际需求确定产品的功能, 在不增加或少增加成本的情况下提高产品的必要功能。成本的合理化是消除由于不必要的功能所引起的多余的成本。通过合理提高功能, 消减成本, 以达到两者最佳配比。

2 价值系数评估

电力工程设计阶段对辅机设备选型的关注点往往不限于一个功能, 需要关注多个功能, 而每个功能变化相应地引起价值变化, 简单的照搬价值公式(1)已不再适用, 因此需要采用改良的公式。文章采用功能指数法^[7]作为计算功能价值 V 的方法。功能指数法又称为相对值法, 即分别计算设备选型中不同方案的总功能系数和总成本系数, 用总功能系数/总成本系数得出各方案价值系数。

价值系数公式:

$$V_i = F_i/C_i \quad (2)$$

式中:

V_i —— i 方案价值系数;

F_i —— i 方案功能系数;

C_i —— i 方案成本系数。

2.1 方案功能系数计算方法

$$F_i = \sum_0^j F_{ij} / \sum_0^j F_{ij} \quad (3)$$

式中:

$\sum_0^j F_{ij}$ —— i 方案 1~ j 项功能加权评分值和:

$$\sum_0^j F_{ij} = (1F_{i1} + 2F_{i2} + 3F_{i3} + \dots)$$

β_j —— 功能重要性系数;

$\sum_0^i \sum_0^j F_{ij}$ —— 1~ i 方案的所有功能评分值之和。

2.2 方案成本系数 C_i 计算方法

$$C_i = \text{方案}i\text{成本} / (\text{各种方案的成本和}) \quad (4)$$

2.3 重要系数 Ψ_j 评价法

重要系数 Ψ_j 评价法, 是一种常用的价值功能评价方法, 其根据不同功能所具有的重要性差别来区别功能的价值。这种方法特别适合应用于需要考虑多个功能的设备选型设计, 其根据各个方案功能之间的复杂及重要程度差异, 确定各方案功能在设备总功能中的不同比重, 所得比重便是其所具有重要系数 Ψ_j 。

为得到功能所具有的重要系数 Ψ_j , 需要对于不同功能的重要程度进行评价和打分。常用的评价方法有环比评分法, 多比例评分法, 0~4 打分法, 0~1 打分法等^[7]。

本文采用 0~4 打分法来评价功能的重要性差别, 其规则如下:

F_1 相比于 F_2 具有很大的重要性, 则 F_1 取 4 分, F_2 取 0 分;

F_1 相比于 F_2 具有较大的重要性, 则 F_1 取 3 分, F_2 取 1 分;

F_1 相比于 F_2 具有同等的重要性, 则 F_1 和 F_2 同时取 1 分;

F_1 相比于 F_2 具有很小的重要性, 则 F_1 取 0 分, F_2 取 4 分;

F_1 相比于 F_2 具有较小的重要性, 则 F_1 取 1 分, F_2 取 4 分。

2.4 辅机设备选型的程序

采用价值系数进行辅机设备选型的程序如下:

1) 确定设备选型不同方案, 进行方案类型的定义;

2) 确定设备主要功能分类, 对各个功能进行定义, 以对设备功能的评价作为价值工程的主要分析对象;

3) 确定不同功能的重要性系数 β_i , 以区分不同功能对设备整个生命周期的重要程度;

4) 计算不同方案的功能系数以及成本系数;

5) 计算不同方案的价值系数, 最终对比价值系数, 采用价值系数值高的方案作为最优的选型方案。

3 案例分析

发电厂中的给水泵主要功能就是提升给水到一定的温度, 并赋予给水压力并输送给水到锅炉省煤器中。给水泵是电厂设备中最为重要的辅机之一, 因此其配置方案的选择对电厂的运行安全性以及运行经济性具有重要影响^[8]。目前国内外 1 000 MW 超超临界主要有 2×50% 容量和 1×100% 容量两种配置方案。基于某百万二次再热机组汽动给水泵配置方案选型, 以此实例分析价值工程在热机辅机设备设计过程中的项目成本控制应用, 并确定合理的配置方案。

汽动给水泵配置方案中各项功能成本很难准确

孤立计算, 因此采用相对值法公式(2)进行价值系数计算。

实例定义 2×50% 容量汽动给水泵为方案 1, 1×100% 容量汽动给水泵方案为方案 2。

3.1 功能系数

3.1.1 功能划分

在汽动给水泵配置方案选择过程中, 主要是从运行可靠性, 初始投资费用, 运行经济性, 设备管道布置, 运行维护方便性五个方面。因此文章将功能划分成 5 个类型, 即运行可靠性为 F_{i1} , 运行经济性为 F_{i2} , 初始投资费用为 F_{i3} , 设备管道布置为 F_{i4} , 运行维护方便性为 F_{i5} , 其中 $i=1$ 代表方案 1, $i=2$ 代表方案 2。

3.1.2 重要系数 Ψ 的确定

因各个工程均具有独特性, 因此不同工程设计过程中对方案各个功能的重视程度不同, 但一般情况, 汽动给水泵选型中, 各功能的重要性排列顺序为运行经济性、运行可靠性、初始投资费用、运行维护方便性、设备管道布置, 即重要性排序为 $F_{i2} > F_{i1} > F_{i3} > F_{i5} > F_{i4}$ 。其中各功能的两两相对重要性如下:

F_{i2} 比 F_{i1} , F_{i3} 和 F_{i5} 重要, 比 F_{i4} 重要的多;

F_{i1} 比 F_{i3} 和 F_{i5} 重要, 比 F_{i4} 重要的多;

F_{i3} 比 F_{i4} 和 F_{i5} 重要;

F_{i5} 比 F_{i4} 重要。

重要系数 Ψ 确定, 文章采用 0~4 评分法确定。评分计算如表 1 所示:

表 1 重要系数 Ψ 评分计算表

Tab. 1 Functional importance coefficient β score calculation table

功能	F_{i1}	F_{i2}	F_{i3}	F_{i4}	F_{i5}	功能总分	重要性系数
F_{i1}	—	1	3	4	3	11	0.275
F_{i2}	3	—	3	4	3	13	0.325
F_{i3}	1	1	—	3	3	8	0.200
F_{i4}	0	0	1	—	1	2	0.050
F_{i5}	1	1	1	3	—	6	0.150
合计	—	—	—	—	—	40	1.000

从上表可得 F_{i1} , F_{i2} , F_{i3} , F_{i4} , F_{i5} 重要系数 Ψ 分别为 $\Psi_{i1}=0.275$, $\Psi_{i2}=0.325$, $\Psi_{i3}=0.2$, $\Psi_{i4}=0.05$, $\Psi_{i5}=0.15$ 。

3.1.3 功能评分

按照运行可靠性运行经济性, 初始投资费用, 设备管道布置, 运行维护方便性五大功能对比, 分别对两种方案进行评分, 对比评分也采用 0~4 评分法, 即:

1) 方案 1 比方案 2 指标优秀得多: 方案 1 得 4 分, 方案 2 得 0 分;

2) 方案 1 比方案 2 指标优秀: 方案 1 得 3 分, 方案 2 得 1 分;

3) 方案 1 比方案 2 指标接近: 方案 1 得 2 分, 方案 2 得 2 分;

4) 方案 1 对比方案 2, 指标不如其优秀: 方案 1 得 1 分, 方案 2 得 3 分;

5) 方案 1 对比方案 2, 指标远不如其优秀: 方案 1 得 0 分, 方案 2 得 4 分。

3.1.3.1 运行可靠性比较

根据国家能源局发布的《2017 年全国电力可靠性年度报告》^[8], 锅炉给水泵组运行可靠性数据摘选如表 2 所示:

表 2 2017 给水泵组按主机容量分类的运行可靠性指标分布

Tab. 2 Distribution of operation reliability indicators of feed waterpump unit by main engine capacity in 2017

主机容量/MW	统计台数/台	运行系数/%	可用系数/%	计划停运系数/%	非计划停运系数/%	非计划停运率/%
200 ~ 299	349	48.94	96.92	3.08	0.00	0.01
300 ~ 399	1 954	44.82	94.45	5.50	0.05	0.11
500 ~ 599	22	43.82	91.26	8.74	0.00	0.00
600 ~ 699	1 147	51.29	93.37	6.61	0.02	0.03
1 000 ~ 1 100	195	63.71	93.42	6.58	0.00	0.00

由表 2 统计数据可知: 1 000 MW 等级机组的给水泵组可用系数为 93.42%, 非计划停运系数为 0.00%, 就汽动给水泵本身可靠性而言, 100% 汽动给水泵与 50% 汽动给水泵可用率均非常高, 但是给水泵也存在一定的非计划停运次数。当泵发生故障时, 对于 1×100% 汽动给水泵方案, 由于无备用泵可用, 机组只能事故停机; 而对于 50% 锅炉给水泵, 当一台泵发生故障时, RB 功能可以保证机组 60% 的发电量, 因此, 采用 1×100% 汽动给水泵方案, 泵组非计划停运机率的的存在使得机组的运行经济性降低。

因此, 综合考虑, 方案 1 运行可靠性功能较优, 且两方案相差不大, 根据 3.1.3 节 0 ~ 4 评分法规则, 判定 $F_{11}=3, F_{21}=1$ 。

3.1.3.2 运行的经济性比较

在不同方案中, 小机效率不同, 给水泵效率不同和小机的排汽背压也不同, 对机组热耗均会产生影响, 结合某百万二次再热机组实际分析, 各方案热耗差异如表 3 所示:

如标煤价按 850 元/t 计, 在机组年利用小时数为 5 500 h 情况下, 根据广东省已投运百万机组负荷运行数据, 不同方案下机组的年均耗煤量以及年均燃料费用如下表所示:

从表 4 可以看出, 与方案 1 暨 2×50% 泵方案相比, 采用方案 2 暨 1×100% 泵方案, 单台机组年均节省燃料费为 112 万, 两台机组年均节省燃料费 224 万元。

表 3 各工况两种给水泵配置方案主机热耗差异表

Tab. 3 Difference in heat consumption of main engine in two feed water pump configuration schemes under various operating conditions

方案	给水泵效率/%	给水泵汽轮机效率/%	小机排汽背压/kPa	小机实际排汽焓/(kJ·kg ⁻¹)	小机进汽减少/(t·h ⁻¹)	主机热耗率差异/(kJ·kWh ⁻¹)
100%THA						
100%容量泵组方案	87.07	85.38	5.2	2 496.75	-3.02	-5.75
2×50%容量泵组方案	85.96	84.56	5.5	2 505.22	基准	基准
75%THA						
100%容量泵组方案	83.49	84.65	5.2	2 626.54	-3.24	-12.08
2×50%容量泵组方案	82.44	83.83	5.5	2 673.72	基准	基准
50%THA						
100%容量泵组方案	75.75	81.08	5.2	2 542.03	-1.72	-4.32
2×50%容量泵组方案	74.35	76.21	5.5	2 550.30	基准	基准
40%THA						
100%容量泵组方案	71.32	70.82	5.2	2 708.89	-1.74	-4.5
2×50%容量泵组方案	74.35	71.29	5.5	2 744.62	基准	基准

表4 单台机组在不同方案下的年耗煤量和燃料费用差异

Tab. 4 Difference in annual coal consumption and fuel cost of a single unit under different schemes

运行负荷	运行小时数h	汽轮机热耗率/(kJ·kWh ⁻¹)		发电标煤耗/(g·kWh ⁻¹)		年耗标煤量差/(t·a ⁻¹)		年燃料费差/(万元·a ⁻¹)	
		1×100%泵	2×50%容量泵	1×100%泵	2×50%泵	1×100%泵	2×50%泵	1×100%泵	2×50%泵
100%THA	2500	-5.75	基准	-0.21	基准	-516.825	基准	-43.90	基准
75%THA	2200	-12.08	基准	-0.16	基准	-262.098	基准	-22.30	基准
50%THA	2300	-4.32	基准	-0.44	基准	-505.949	基准	-43.01	基准
40%THA	500	-4.50	基准	-0.16	基准	-32.817	基准	-2.80	基准
合计	—	—	—	—	—	-1 317.690	—	-112.01	—

因此,从运行经济性分析,方案2优于方案1,且两方案相差不大,根据3.1.3节0~4评分法规则,判定 $F_{12}=1, F_{22}=3$ 。

3.1.3.3 初始投资费用

根据目前百万二次再热机组给水泵采购情况,2×50%容量给水泵和1×100%容量给水泵均为全进口或者进口组装。

两个配置方案所配小机都可以配置国产产品,两种方案配置的差异不同是:1×100%容量给水泵汽轮机方案一般配置独立的小凝汽器及其冷却系统;2×50%容量给水泵汽轮机方案可合并排汽至大机凝汽器。两种方案的造价差异见下表所示:

结合上表所示,可知采用1×100%容量给水泵方案相对于采用2×50%容量给水泵方案,两台机

表5 100%全容量给水泵汽轮机和2×50%容量给水泵汽轮机投资价格比较

Tab. 5 Comparison of investment price between 100% full capacity feed water pump turbine and 2×50% capacity feed water pump turbines

项目	单位:万元	
	2×50%容量给水泵汽轮机	1×100%全容量给水泵汽轮机
主给水泵芯包	2 350	1 900
给水泵汽轮机本体	1 900	2 000
排汽管道及排汽蝶阀	300	—
小凝汽器本体(不含换热管)	无论排汽去向,机组总凝汽量近似一致,总换热面积一致	150 (仅小凝汽器壳体)
循环水管道	—	45
循环水蝶阀	—	30
辅助小设备	—	50
泵组基础	近似一致	近似一致
合计	4 550	4 175

组可降低造价约375万元,减费比率约为8%,方案2优于方案1,且两方案相差不大。

因此从初始投资对比,根据3.1.3节0~4评分法规则,判定 $F_{13}=1, F_{23}=3$ 。

3.1.3.4 设备管道布置

100%容量给水泵方案,需要配套增加小机凝汽器系统,循环冷却水系统及小机凝结水系统,因此对比布置,方案1优于方案2,且两方案相差不大,根据3.1.3节0~4评分法规则,判定 $F_{14}=3, F_{24}=1$ 。

3.1.3.5 运行维护

如3.1.3.4所述,100%容量给水泵方案,需要配套增加小机凝汽器系统,循环冷却水系统及小机凝结水系统,维护系统会增加。综合给水泵组和其配套系统,方案1优于方案2,且两方案相差不大,根据0~4评分法规则,判定 $F_{15}=3, F_{25}=1$ 。

3.1.4 功能系数取值

将上述评分判定汇总如表6所示:

表6 方案功能评分对比表

Tab. 6 Comparison of scheme function scores

方案1	评分	方案2	评分	功能重要系数
F_{11}	3	F_{21}	1	0.275
F_{12}	1	F_{22}	3	0.325
F_{13}	1	F_{23}	3	0.200
F_{14}	3	F_{24}	1	0.050
F_{15}	3	F_{25}	1	0.150

按公式(4)可得:

$$\sum F_{1j} = 0.275 \times 3 + 0.325 \times 1 + 0.2 \times 1 + 0.05 \times 3 + 0.15 \times 3 = 1.95$$

$$\sum F_{2j} = 0.275 \times 1 + 0.325 \times 3 + 0.2 \times 3 + 0.05 \times 1 + 0.15 \times 1 = 2.05$$

按公式(3)可得:

$$\text{方案1功能系数 } F_1 = 1.95 / (1.95 + 2.05) = 0.4875$$

$$\text{方案2功能系数 } F_2 = 2.05 / (1.95 + 2.05) = 0.5125$$

3.2 成本系数

根据表 5 可得方案 1 成本为 4 550 万元, 方案 2 成本为 4 175 万元。

根据公式(4)可得:

方案 1 成本系数 $C_1=4\ 550/(4\ 550+4\ 175)=0.521\ 5$

方案 2 成本系数 $C_2=4\ 175/(4\ 550+4\ 175)=0.478\ 5$

3.3 价值系数

根据公式(2)可得:

方案 1 价值系数 $V_1=F_1/C_1\approx 0.934\ 8$

方案 2 价值系数 $V_2=F_2/C_2\approx 1.051\ 3$

$V_2>V_1$ 从价值系数判断, 本工程宜采用方案 2 即 $1\times 100\%$ 容量汽动给水泵配置方案。针对百万机组给水泵配置方案, 欧洲一般采用全容量汽泵方案; 在国内, 随着相关制造商制造水平的提高, 目前新建机组也逐渐接受全容量给水泵方案。而本文也根据价值系数理论阐述了 $1\times 100\%$ BMCR 容量汽动给水泵方案的优越性。

4 总结

热机设备方案选型是发电工程热机设计的重要内容, 一些重要设备的方案选择, 关系到电厂建设的初始投资, 同时对电厂建成后运行的安全可靠、运行维护成本以及机组的整体经济性都有着重要影响。因此, 重要设备的方案选择要综合考虑功能、投资、运营等多方面。

本文首次借鉴价值工程理论用于热机辅机设备选型领域, 利用价值方程和价值系数方程, 将设备的功能与成本统一为一个价值因子, 通过比较不同方案的价值因子, 作为方案选择依据。并以某百万千瓦二次再热机组汽动给水泵配置方案选择实例, 详细地介绍了其工作程序, 计算结果表明价值工程理论应用在热机设备方案选型中是可行的。

但同时需要指出, 价值工程方法在国内建设项目中的应用还不广泛, 文章也仅针对部分设备选型过程的理论进行融合探讨, 需要进一步扩展研究数据, 才能使其理论价值发挥更大的作用。

参考文献:

[1] 孙士明. 价值工程在电力设备采购招标中的应用研究 [D]. 北

京: 华北电力大学, 2011.

SUN S M. Research on applications of VE in electric power equipment bidding [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.

[2] 田伟. 我国价值工程发展现状及推进建议 [J]. 建筑施工, 2021, 43(2): 331-334. DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2021.02.051.

TIAN W. Development status and promotion suggestion of value engineering in China [J]. Building Construction, 2021, 43(2): 331-334. DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2021.02.051.

[3] 孙慧. 项目成本管理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

SUN H. Project Cost Management [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.

[4] 吴添祖. 技术经济学概论(2版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.

WU T Z. An introduction to tech - economics (2nd ed.) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.

[5] 王乃静. 价值工程概论 [M]. 北京: 经济科学出版社, 2006.

WANG N J. Introduction to Value Engineering [M]. Beijing: Economic Science Press, 2006.

[6] 孔娟. 电力工程项目设计阶段的造价控制管理研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2009.

KONG J. Researchs on cost management and control for electric power projects during design phase [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2009.

[7] 席国超. 基于价值工程的建设施工项目成本控制方法及应用研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.

XI G C. Research on the application of value engineering in construction project cost control [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.

[8] 韩功博. 1 000 MW二次再热发电机组全容量给水泵选型浅析 [J]. 电力设备管理, 2021(5).

[9] 国家能源局. 2017年全国电力可靠性年度报告 [R]. 北京: 国家能源局, 2018.

National Energy Administration. Annual report of national electricity reliability in 2017 [R]. Beijing: National Energy Administration, 2018.

作者简介:



邹罗明

邹罗明(第一作者, 通信作者)

1985-, 男, 江西抚州人, 高级工程师, 清华大学动力工程与工程热物理专业硕士, 主要从事发电技术与节能研究(e-mail)zouluoming@gedi.com.cn。

(编辑 孙舒)