

凝汽透平驱动向电力驱动转变的研究

赵 军

北京石油化工工程有限公司, 北京

收稿日期: 2024年2月22日; 录用日期: 2024年3月4日; 发布日期: 2024年4月16日

摘 要

本文从节能与减少碳排放的角度, 引出凝汽透平驱动向电力驱动转变研究的必要性。给出能耗计算模型和碳排放计算模型; 通过对凝汽透平驱动、电力驱动的计算结果进行对比, 得出电力驱动方式在降低能耗、减少碳排放、提高能量利用率三个方面优于凝汽透平驱动方式的结论, 并给出动设备驱动方式选择的建议。

关键词

能耗, 碳排放, 凝汽透平驱动, 电力驱动

Study on the Transformation from Condensation Steam Turbine Drive to Electric Drive

Jun Zhao

Beijing Petrochemical Engineering Co., Ltd., Beijing

Received: Feb. 22nd, 2024; accepted: Mar. 4th, 2024; published: Apr. 16th, 2024

Abstract

From the perspective of energy saving and carbon emission reduction, it is necessary to study the transformation from condensation steam turbine drive to electric drive. The energy consumption calculation model and carbon emission calculation model are given. By comparing the calculation results of condensation steam turbine drive mode and electric drive mode, it is concluded that the electric drive mode is superior to the condensation steam turbine mode in three aspects: reducing energy consumption, reducing carbon emissions and improving energy utilization rate, and some suggestions on the selection of rotating equipment drive mode are given.

Keywords

Energy Consumption, Carbon Emissions, Condensation Steam Turbine Drive, Electric Drive

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

随着国家碳达峰、碳中和政策的深入, 节约能源、减少碳排已成为社会共识, 针对“双碳”相关问题, 国内学者进行了大量的研究工作[1]-[8]。张长鲁[1]以中国知网期刊数据库双碳相关文献为研究对象, 采用系统聚类方法对文献进行聚类, 形成 13 类研究主题。关睢文[2]选取已实现碳达峰的部分国家为研究对象, 从不同发展阶段剖析碳排放的演变规律。侯芹芹[3]对比分析了现有国内外“碳中和”措施特点, 提出了满足经济发展需要和生态环境治理要求的产业“碳中和”规划方案。支现方[4]从相关概念出发, 对碳达峰和碳中和背景下工业低碳发展制度的现状和策略进行了探讨。朱天白[5]针对石油石化行业高物耗、高能耗的现状, 提出现阶段石油化工行业从源头、过程到末端控制进行减碳路径。杨雪[6]根据钢铁行业的特点, 给出了钢铁行业“双碳”实现路径。朱超[7]结合煤炭开发利用的全生命周期, 提出煤炭低碳化发展对策措施。郑海宁[8]根据化工行业的特点, 分别从指标权重和评价方法对化工行业的碳排放绩效评价进行了总结。

相关政策指出[9] [10] [11], 推进我国碳达峰碳中和工作, 应坚持节约优先、非化石能源替代、再电气化等战略; 对重点领域节能降碳[11], 应积极探索蒸汽驱动向电力驱动转变, 开展供电系统适应性改造。现有的工业企业往往设置燃煤锅炉, 以满足企业用汽的需求, 因为燃煤锅炉产生蒸汽的价格较低, 所以企业装置内的大功率动力设备, 通常采用蒸汽透平进行驱动[12] [13] [14] [15]。企业的动力站, 存在锅炉效率低、透平效率低、凝汽机组冷端损失较大、能耗大、碳排放量大等问题。

为提高能量转化率、减少能耗、降低碳排放, 本文对凝汽透平驱动向电力驱动转变进行研究, 对两种驱动方式进行定量对比及分析。

2. 计算模型

2.1. 能耗计算模型

动力设备能耗[16]按公式(1)计算

$$EN = \sum G_i \times C_i \quad (1)$$

式中: EN ——动力设备能耗, 千克标煤/小时(kgce/h); G_i ——工质消耗量, t/h 或 kW; C_i ——能源折算值, kgce/t 或 kgce/(kW·h), 见表 1。

2.2. 碳排放量计算模型

1) 化石燃料燃烧过程, 二氧化碳排放量[17], 按公式(2)计算

$$E_{\text{燃烧}} = \sum FC_i \times C_{ar} \times OF_i \times \frac{44}{12} \quad (2)$$

Table 1. Energy conversion value (standard coal)**表 1.** 能源折算值(标煤)

序号	类别	计量单位	能源折算值 kgce/(kW·h)或 kgce/t	备注
1	电	kW·h	0.315	—
2	标准油	t	1428.57	
3	标准煤	t	1000	
4	3.5 MPa 级蒸汽	t	125.71	3.0 MPa ≤ P < 4.5 MPa
5	1.0 MPa 级蒸汽	t	108.57	0.8 MPa ≤ P < 1.2 MPa

式中： $E_{\text{燃烧}}$ ——燃料燃烧的碳排放量，单位为吨二氧化碳(tCO₂)； FC_i ——燃料的消耗量，t 或 10⁴ Nm³； C_{ar} ——收到基含碳量，单位为吨碳/吨(tC/t)或吨碳/万标立(tC/10⁴ Nm³)； OF_i ——碳氧化率，%；相关参数见表 2。

Table 2. Default values of common fossil fuel related parameters**表 2.** 常用化石燃料相关参数缺省值

能源名称	计量单位	低位发热量 GJ/t 或 GJ/10 ⁴ Nm ³	单位热值含碳量 tC/GJ	碳氧化率 %
原油	t	41.816	0.02008	
燃料油	t	41.816	0.0211	98
汽油	t	43.070	0.0189	
柴油	t	42.652	0.0202	
天然气	10 ⁴ Nm ³	389.31	0.01532	99

2) 标准煤燃烧过程，二氧化碳排放量[18]，按公式(3)计算

$$E_{\text{标煤}} = FC \times Q_{ar} \times EF \quad (3)$$

3) 购入电力或热力，二氧化碳排放量[18]，按公式(4)计算

$$E = AD \times EF \quad (4)$$

式中： FC ——标准煤的消耗量，t； Q_{ar} ——标煤收到基低位热值，GJ/t； EF ——CO₂ 排放因子 tCO₂/GJ (或 tCO₂/MW·h)； E ——购入电量(或热量)产生的排放量，单位吨二氧化碳(tCO₂)； AD ——购入的电量(或热量)，MW·h (或 GJ)；相关参数见表 3。

Table 3. CO₂ emission factors of various fuels**表 3.** 各种燃料的 CO₂ 排放因子

燃料种类	低位热值	CO ₂ 排放因子	备注
标准煤	29.271 GJ/t	0.084 t/GJ	注 1
企业自备电站供热	-	0.150 t/GJ	注 1
国网供电	-	0.5810 (MW·h)	注 2

注 1、数据来源于文献[17]；注 2、数据来源于文献[18]。

2.3. 运行费用计算

随着我国碳交易市场的正式运行[19][20]，年运行费用计算应考虑碳排放产生的费用，因此设备年运行费用包括：电费、燃料费、设备折旧维修费、碳排放费，计算公式为：

$$C = C_d + C_r + (f_i + f_j)K + C_c \quad (5)$$

式中： C_d ——电能费用，元/年； C_r ——燃料费用，元/年； $(f_i + f_j)K$ ——设备折旧及维修费用； C_c ——碳排放费用，元/年； f_i ——折旧率占比，可取 5%； f_j ——维修费用占比，可取 3%； K ——工程投资，元。

3. 计算结果

对动力设备采用电动机驱动方式、蒸汽透平驱动方式，分别计算能耗、碳排放量、年运行费用、能量利用率。

3.1. 计算实例

某动力设备轴功率为 $N = 5000$ kW，传动效率 η 为 0.97。透平进汽参数 3.5 MPa、420℃、排汽压力 0.015 MPa，天然气热值为 38.931 MJ/Nm³，标准煤热值为 29.271 MJ/kg。

按以下方案计算及对比：方案一：电动机驱动；方案二：燃气锅炉 + 凝汽透平；方案三：燃煤锅炉 + 凝汽透平。

1) 能耗计算

- 方案一： $EN_d = N/\eta \times C_d = 5000/0.97 \times 0.315 = 1623.7$ kgce/h
- 方案二或方案三：由透平耗汽量计算得 5000 kW 透平消耗 3.5 MPa 蒸汽 24.21 t/h，能耗为：
 $EN_i = 24.21 \times C_i = 24.21 \times 125.71 = 3043.4$ kgce/h
- 凝汽透平驱动比电驱动增加能耗： $(3043.4 - 1623.7)/1623.7 = 87.4\%$

2) 碳排放计算

- 方案一： $E_d = N/\eta \times EF = 5000/0.97/1000 \times 0.581 = 2.995$ t/h
- 方案二：经燃烧计算得燃气耗量为 2092.4 Nm³/h，自耗电按照轴功率的 5% 考虑，

$$\begin{aligned} E_g &= FC_i \times C_{ar} \times OF_i \times \frac{44}{12} + AD \times EF \\ &= \frac{2092.4}{10^4} \times 389.31 \times 0.01532 \times 99\% \times \frac{44}{12} + 250/1000 \times 0.581 \\ &= 4.675 \text{ t/h} \end{aligned}$$

- 方案三：按能耗计算燃煤耗量为 3043.4 kgce/h， $E_c = FC \times Q_{ar} \times EF = \frac{3043.4}{10^3} \times 29.271 \times 0.084 = 7.483$ t/h

注：由于煤量是按照能耗折算的值，所以电耗不应该重复考虑了，下面运行费用，能量利用率均相同。

- 方案二比方案一增加碳排放： $(4.675 - 2.995)/2.995 = 56.1\%$
- 方案三比方案一增加碳排放： $(7.483 - 2.995)/2.995 = 149.8\%$

3) 年运行费用计算

单价按如下选取：电费 0.57 元/(kW·h)，天然气 3.5 元/Nm³，煤价为 850 元/t，碳排放 50 元/t，年运行时间 8000 h。

- 方案一：

$$\begin{aligned}
C &= C_d + C_r + f_i + f_j K + C_C \\
&= \frac{5000}{0.97} \times 0.57 \times 0.8 + 0.05 + 0.03 \times 1500 + 50 \times 2.995 \times 0.8 \\
&= 2350.5 + 120 + 119.8 = 2590.3 \text{ 万元/年}
\end{aligned}$$

➤ 方案二:

$$\begin{aligned}
C &= C_d + C_r + f_i + f_j K + C_C \\
&= 250 \times 0.57 \times 0.8 + 2092.4 \times 3.5 \times 0.8 + 0.05 + 0.03 \times 3300 + 50 \times 4.675 \times 0.8 \\
&= 114 + 5858.7 + 264 + 187 = 6423.8 \text{ 万元/年}
\end{aligned}$$

➤ 方案三:

$$\begin{aligned}
C &= C_r + f_i + f_j K + C_C \\
&= 3.0434 \times 850 \times 0.8 + 0.05 + 0.03 \times 3300 + 50 \times 7.483 \times 0.8 \\
&= 2069.6 + 264 + 299.3 = 2632.9 \text{ 万元/年}
\end{aligned}$$

➤ 方案二比方案一增加运行费: $(6423.8 - 2632.9) / 2632.9 = 148.0\%$

方案三比方案一增加运行费: $(2632.9 - 2590.3) / 2590.3 = 1.6\%$

4) 能量利用率计算

➤ 方案一:

发电厂及电力传输总效率按 39% 考虑, 电动机传动效率按 97% 考虑。

总输入能量为: $EN_d = N / \eta / 0.39 = 5000 / 0.97 / 0.39 = 13217 \text{ kW}$

能量利用率为: $U_d = 5000 / 13217 = 37.83\%$

➤ 方案二:

总输入能量为: $EN_g = FC \times Q_{ar} / 3600 + N / 0.39 = 2092.4 \times 38931 / 3600 + 250 / 0.39 = 23269 \text{ kW}$

能量利用率为 $U_g = 5000 / 23269 = 21.49\%$

➤ 方案三:

总输入能量为: $EN_C = FC \times Q_{ar} / 3600 = 3043.4 \times 29271 / 3600 = 24745 \text{ kW}$

能量利用率为: $U_C = 5000 / 24745 = 20.21\%$

➤ 方案二比方案一能量利用率低: $37.83\% - 21.49\% = 16.34\%$

方案三比方案一能量利用率低: $37.83\% - 20.21\% = 17.62\%$

3.2. 不同功率设备计算结果

对于不同功率的动力设备, 仍按以上三种方案进行计算, 方案一: 电动机驱动; 方案二: 燃汽锅炉 + 凝汽透平; 方案三: 燃煤锅炉 + 凝汽透平。计算结果汇总见表 4~表 7 所示。

Table 4. Calculation results of energy consumption

表 4. 能耗计算结果

序号	设备功率 kW	方案一		方案二或方案三		
		电耗 kW·h	能耗 tce/h	蒸汽耗量 t/h	能耗 tce/h	对比%
1	1000	1030.9	0.325	6.47	0.813	150.5
2	5000	5154.6	1.624	24.21	3.043	87.4
3	10000	10309.3	3.247	45.30	5.695	75.4
4	15000	15463.9	4.871	66.17	8.319	70.8

注: 表中对比项为高于或低于电动机方案的比值, 蒸汽耗量来自透平厂家样本。

Table 5. Calculation results of carbon emissions**表 5.** 碳排放量计算结果

序号	设备功率	方案一		方案二		方案三		
	kW	碳排放量 tCO ₂ /h	燃气消耗 Nm ³ /h	碳排放量 tCO ₂ /h	对比 %	煤耗 kg/h	碳排放量 tCO ₂ /h	对比 %
1	1000	0.599	115.9	1.240	107	813.4	2.000	233.9
2	5000	2.995	550.6	4.675	56.1	3043.5	7.483	149.8
3	10000	5.990	1079.9	8.767	46.4	5718.9	14.002	133.8
4	15000	8.985	1605.6	12.817	42.7	8318.5	20.453	127.6

注：表中对比项为高于或低于电动机方案的比值，燃料消耗量来自锅炉厂商资料。

Table 6. Calculation results of annual operating cost**表 6.** 年运行费用计算结果

序号	设备功率	方案一	方案二		方案三	
	kW	万元/年	万元/年	对比%	万元/年	对比%
1	1000	518	1710	230.1	705	36.1
2	5000	2590	6424	148.0	2633	1.6
3	10000	5181	12069	133.0	4961	-4.2
4	15000	7771	17660	127.3	6457	-15.8

注：表中对比项为高于或低于电动机方案的比值。

Table 7. Calculation results of energy utilization efficiency**表 7.** 能源利用效率计算结果

序号	设备功率	方案一	方案二		方案三	
	kW	%	%	对比%	%	对比%
1	1000	37.83	16.19	-21.64	15.12	-22.71
2	5000	37.83	21.49	-16.34	20.20	-17.63
3	10000	37.83	22.92	-14.91	21.60	-16.23
4	15000	37.83	23.52	-14.31	22.18	-15.65

注 1：表 4~表 6 中，对比项为高于或低于方案一的比值；注 2：表 7 中，对比项为低于方案一的值。

4. 计算结果分析

将表 4~表 7 的计算结果，绘制成曲线，如图 1~图 4。

4.1. 能耗分析

从图 1 中可以看出，电动机驱动方案能耗较低，凝汽透平驱动方案能耗较高，由表 4 中可以看出，凝汽透平驱动方案能耗高于电驱动方案的比例，随设备功率的增加而降低。

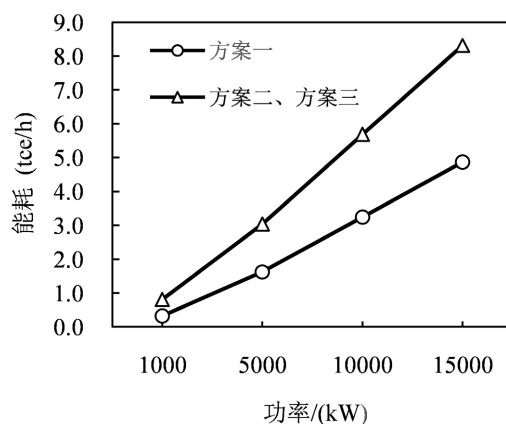


Figure 1. Comparison of energy consumption
图 1. 能耗对比

4.2. 碳排放量分析

从图 2 中可以看出，燃煤锅炉方案碳排放最大，燃气锅炉方案碳排放次之，电驱动碳排放最小，由表 5 可以看出，燃煤锅炉的碳排放量比电驱动碳排放量多 120%~240%，燃气锅炉的碳排放量比电驱动碳排放量多 40%~110%。燃煤锅炉、燃气锅炉方案碳排放量超出电驱动方案的比例，随设备功率的增加而降低。

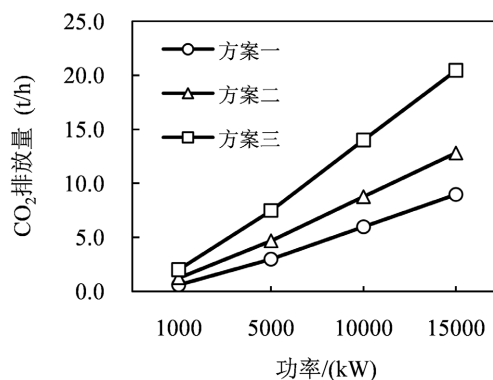


Figure 2. CO₂ emission comparison
图 2. CO₂ 排放量对比

4.3. 运行费用分析

从图 3 中可以看出，燃气锅炉方案运行费用最高；当设备功率小于 5000 kW 时，燃煤锅炉方案运行费用高于电驱动，当功率大于 5000 kW 时，燃煤方案运行费用略低于电动机方案。从表 6 中可以看出，燃气锅炉、燃煤锅炉年运行费用超出电驱动方案的比例，随着设备功率的增加而降低。

4.4. 能量利用率分析

图 4、表 7 是对三种驱动方式能源利用率进行对比，发电厂及电力传输总效率按 39%考虑，电动机传动效率按 97%考虑。从图 4 中可以看出，电驱动方案能源利用率约为 38%，不随设备功率而变化。燃气方案的能量利用率略高于燃煤方案，且随设备功率的增加而增加。

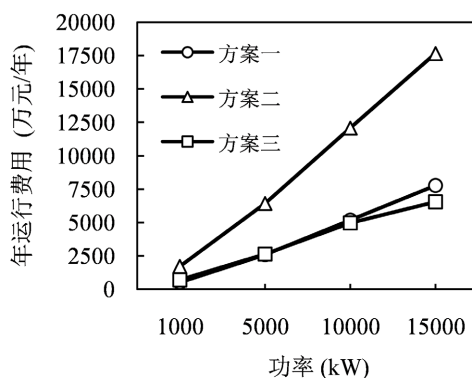


Figure 3. Comparison of annual operating cost
图 3. 年运行费用对比

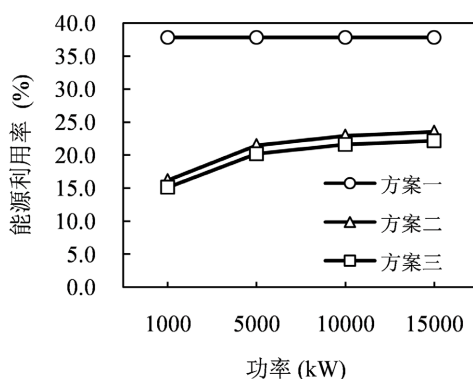


Figure 4. Comparison of energy efficiency
图 4. 能源利用率对比

5. 结论及建议

5.1. 结论

根据国家标准、行业标准中的公式，对不同功率的设备从能耗、碳排放量、运行费用、能源利用率 4 个方面，对电驱动方案与蒸汽驱动方案进行了对比，基于对计算结果的分析，可以得到如下结论：

1) 能耗：电驱动方案能耗较低，凝汽透平方案能耗较高，凝汽透平方案能耗较电驱动方案高 70%~150%。

2) 碳排放量：电驱动方案碳排放量最少，燃气锅炉方案碳排放量稍大，高出电驱动方案 40%~110%，燃煤锅炉方案碳排放量最大，高出电驱动方案 120%~240%。

3) 运行费用：考虑了碳排放的成本后，电力驱动方案和燃煤锅炉方案运行费用相当，燃气锅炉方案运行费用最高。

4) 能量利用率：电力驱动方案能量利用率最高，约为 38%；燃煤锅炉、燃气锅炉的能量利用率较低，约为 15%~24%。

5.2. 建议

通过上述分析可以看出：电力驱动方案与凝汽透平方式相比，电力驱动能耗较少、碳排放最少、运行费用较低、能量利用率最高，推荐动力设备蒸汽驱动向电力驱动转变。燃煤锅炉相对与燃气锅炉方案，

运行费用较低, 碳排放较高, 能量利用率相当。

当蒸汽管网有大量蒸汽放空时采用凝汽透平方案, 除此情况之外, 动力设备驱动均建议采用电力驱动方案, 并加快已有设备凝汽透平驱动向电力驱动改造。

参考文献

- [1] 张长鲁, 赵东燕, 倪渊. 国内碳达峰、碳中和领域研究主题挖掘与热点探究[J]. 价格理论与实践, 2022(5): 110-113, 206.
- [2] 关睢文, 周琪, 毛保华. 碳排放控制的国际比较及经验借鉴[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022(6): 281-290.
- [3] 侯芹芹, 崔新悦, 宋子立, 等. “碳达峰”背景下的“碳中和”措施研究分析[J]. 当代化工, 2021, 50(11): 2727-2730, 2736.
- [4] 支现方, 宋旭. 碳达峰与碳中和背景下工业低碳发展制度探讨[J]. 能源与节能, 2022(3): 39-40.
- [5] 朱天白, 宋子立. “双碳”形势下石油石化行业发展的思考[J]. 当代化工, 2021, 50(11): 2644-2730, 2647.
- [6] 杨雪. 钢铁行业“双碳”实现路径[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(4): 177-179, 182.
- [7] 朱超, 史志斌, 鲁金涛. 碳达峰、碳中和对我国煤炭工业发展的影响及对策[J]. 煤炭经济研究, 2021, 41(4): 59-64.
- [8] 郑海宁, 蒋枫, 李露. 化工行业碳排放绩效评价方法综述[J]. 当代化工, 2016, 45(5): 957-960, 964.
- [9] 中国工程院. 我国碳达峰碳中和战略及路径[R]. 2022: 3.
- [10] 科技部, 国家发展改革委, 工业和信息化部, 等. 科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022-2030年)[Z]. 2022.
- [11] 国家发改委, 等. 关于严格能效约束推动重点领域节能降碳的若干意见[Z]. 2021.
- [12] 周志安, 谭克强, 肖业俭, 曲光明. 汽轮机替代电机拖动烧结主抽风机的探讨[J]. 烧结球团, 2010, 35(5): 1-4.
- [13] 潘春晖, 段雅丽. 离心压缩机不同驱动方式的经济性分析[J]. 化工管理, 2016(23): 11.
- [14] 高小玲, 杨唯. 空分装置中原料空气压缩机不同驱动方案的投资估算动态指标对比[J]. 浙江化工, 2018, 49(10): 41-43.
- [15] 施豫祖. 蒸汽驱动与电力驱动能量利用率浅析[J]. 化工设计, 1993(3): 33-34, 49.
- [16] 郭文豪, 赵建炜, 魏志强, 等. GB/T 50441-2016. 石油化工设计能耗计算标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- [17] 生态环境部. 企业温室气体排放核算方法与报告指南发电设施(2022年修订版)[Z]. 2022.
- [18] 孟宪玲, 李希宏, 翟齐, 等. SH/T 5000-2011. 石油化工生产企业 CO₂ 排放量计算方法[S]. 北京: 中国石化出版社, 2012.
- [19] 刘逸飞. 我国碳排放权市场影响因素分析[J]. 中国林业经济, 2021(1): 79-82.
- [20] 肖佳, 王瀚悦. 2022年第二季度碳交易市场行情[J]. 天然气技术与经济, 2022, 16(4): 81-82.