

移动式余热利用系统的经济性研究

郭少朋¹, 赵 军², 安青松², 高 维²

(1. 内蒙古科技大学 能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010;

2. 天津大学 机械工程学院中低温热能高效利用教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 在移动式余热利用实验系统基础上, 对移动式余热利用系统的实际应用规模进行了成本和收益估算。通过两项经济性指标(净现值和投资回收期)进行了系统经济性的分析研究, 并结合蓄热器充热时间、热源距离、余热价格等因素进行了项目的敏感性分析。结果表明, 对于案例中的移动式余热利用项目, 当余热成本发生变化时折现率取 7%、10%、12% 和 15% 时, 对应项目在系统运行年限内的净现值大于零。根据余热成本的不同, 在 4 种折现率情况下最长的投资回收期分别为 13 a、9 a、11 a 和 15 a。上述经济性指标表明案例中的移动式余热利用项目从经济性上考虑是可行的。蓄热器充热时间和热源距离对项目经济性的影响程度基本相同, 均大于余热价格对项目经济性的影响。该经济性研究为移动式余热利用项目的决策提供了参考依据。

关 键 词: 移动式余热利用; 经济性; 敏感性分析

中图分类号: TK115 文献标识码: A

引 言

MWHU(移动式余热利用技术)是针对我国工业余热情况开展的一项集余热回收、蓄热和供热应用为一体的综合能源利用技术。它通过蓄热材料将余热源侧的余热进行回收, 利用汽车、火车或轮船等交通工具将蓄热材料运输到用户处, 然后通过热交换器将热量释放到用户处的供热系统中。

国外一些学者进行了大量系统实验和应用研究。日本栗本铁工株式会社科技发展研究所热工部的 Fujita 等人利用无机相变材料醋酸钠和有机相变材料赤藻糖醇进行了低温余热收集和运输的应用研究^[1], 并建立了小型示范工程。东京核能与创新能源系统研究所的 Yukitaka 等人对日本余热资源和移动式余热利用系统的应用范围进行了调研和总

结^[2]。瑞典麦拉达伦大学的王维龙等人进行了应用移动式余热利用系统替代当地小型燃煤锅炉系统的可行性研究^[3]。

为了适应我国的余热资源情况和用户特点, 本文结合实际情况对移动式余热利用系统进行了经济性分析研究, 以期为该项目在国内的立项和建设提供一些参考和依据。

1 成本和收益估算

1.1 成本估算

1.1.1 投资成本估算

在对实际规模蓄热器进行成本估算过程中取长方体间接式蓄热器作为研究对象, 蓄热器尺寸按照 20GP 标准集装箱规格设计, 体积为 26.4 m³。蓄热器内蓄热材料装载体积比例为 85%。换热管设置采用文献[1]实验中的管径与箱体体积比例。蓄热器的部件参数和费用估算详细情况如表 1 所示。

蓄热器总重量为 37.2 t, 考虑重型卡车配置拖挂后的重量约为 47.2 t^[10-11]。根据《道路车辆外廓尺寸、轴荷及质量限值》(GB 1589-2004)进行校核表明从重量上考虑该案例中的蓄热器是符合要求的。

系统中其它设备如管道、阀门和仪表等按 1 万元计算。设备安装费参照《机械工业建设项目概算编制办法及各项概算指标》中热水锅炉房标准计算。考虑到移动式余热利用系统的具体情况, 取设备安装费为总设备费的 7%, 共计 6.1 万元。热源和用户侧的改造施工费约为 5 万元。因此, 项目总投资成本共计 98.78 万元。

收稿日期: 2014-02-18; 修订日期: 2014-03-10

基金项目: 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY14164)

作者简介: 郭少明(1983-), 男, 河北邢台人, 内蒙古大学博士。

表 1 移动式余热利用系统蓄热器部件参数与费用估算

Tab.1 Parameters of the components of the heat accumulator in the movable type waste heat utilization system and estimation of the costs

名称	规格 /mm	重量 /t	单价 /万元·t ⁻¹	费用 /万元
蓄热材料 (赤藻糖醇)	工业级	32.7	2.5 ^[5]	81.75
换热管 (钢管)	140×4.5 19 根	1.70	0.40 ^[6]	0.68
肋片 (钢带)	95×1.5 76 片	0.50	0.40 ^[6]	0.20
蓄热器外壳 (钢板)	4	1.80	0.50 ^[6]	0.90
保温层 (岩棉、聚氨酯)	20 岩棉 50 聚氨酯	0.12 0.13	0.48 ^[7] 0.70 ^[8]	0.15
箱体外壳	2	0.20	-	3.00 ^[9]
共计	-	37.2	-	86.68

1.1.2 运行成本估算

运输费用实行包车制付费,取 0.4 元/t·km^[12]。若热源与用户间距离为 10 km,卡车运输时速 40 km/h,蓄热器往返热源与用户间的运输时间为半小时,则进行一次蓄热器运输的运费为 297.6 元。根据系统实验和模拟研究数据可知,优化后的蓄热器充热时间为 3 h、放热时间为 1 h^[13]。在 120 d 的供暖季内,蓄热器在热源与用户间共可往返运送 600 趟,涉及的运输成本共计 17.9 万元。

由于余热属于二次回收利用资源,目前尚无统一价格标准,在经济性分析中将余热资源的年运行费用分为 7 类进行讨论。本研究案例中系统的年收益为 44.8 万元,在扣除年运输成本 17.9 万元后得到余热年运行成本的变动范围为 0-26.9 万元,因此 7 类余热年运行费用分别为 0、5、10、15、20、25 和 26.9 万元。

1.2 收益估算

移动式余热利用系统的收益估算为:

$$I = fn\eta Q_{max} 10^{-5} / 103.68q_i \quad (1)$$

式中: I—应用移动式余热利用系统进行供暖的收益,万元/年; f—供暖收费标准,25 元/m²; n—移动式余热利用供热系统一年内的供热次数,600 次; η—移动式余热利用系统效率,90%; Q_{max}—蓄热器

的最大放热量,GJ; q_i—供暖热负荷指标,40 W/m² (包含 5% 的管网热损失)^[14]。

蓄热器完成放热过程后,进行下一次充热时的初始温度约为 50 °C。蓄热器的最大蓄热量为:

$$Q_{max} = m_{PCM} \Delta H + m_{PCM} C_{p,PCM} \Delta T \quad (2)$$

式中: Q_{max}—蓄热器的最大蓄热量,MJ; m_{PCM}—蓄热材料的质量,32.7×10³ kg; ΔH—蓄热材料的相变潜热,339×10⁻³ MJ/kg; C_{p,PCM}—蓄热材料的比热,值为 1.35×10⁻³ MJ/kg·°C (20 °C) 2.74×10⁻³ MJ/kg·°C (140 °C); ΔT—蓄热材料的温差,°C。

通过式(2)计算蓄热器的最大蓄热量 Q_{max} 约为 13.8 GJ。因此由式(1)可知,在 120 d 的供暖季内应用移动式余热利用系统进行供热取得的收益为 44.8 万元。

2 经济性评价

2.1 净现值

移动式余热利用项目的净现值计算式为:

$$NPV = \sum_0^l \frac{I_t - C_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (3)$$

式中: NPV—项目净现值,万元; I_t—系统运行第 t 年的收益,万元; C₀—系统的投资成本,万元; C_t—系统运行第 t 年的运行成本,万元; r—折现率; l—系统的运行年限。假设移动式余热利用项目运行年限为 15 a,对于上述分析的 7 类余热运行成本,当折现率 r 取 7%、10%、12% 和 15% 时系统的 NPV 值随项目运行年份的变化情况如图 1 所示。

从图 1 中可以看到,当折现率取 7% 时,余热运行成本为 0、5、10 和 15 万元时对应系统的 NPV 值在 15 年内为正值,表示在项目运行年限内可收回成本并产生一定利润。当折现率分别取 10%、12% 和 15%,对应余热价格为 0、5 和 10 万元时系统 NPV 值在 15 年内为正值,通过净现值分析项目经济可行。另一方面,分析图 1 中不同折现率条件下系统的 NPV 值可知,随着折现率的提高,项目收益越来越低,可接受的余热成本也越来越低。由于一般情况下工程项目的折现率不会高于 15%^[15],因此,当余热成本低于 10 万元时该项目在经济性上具有一定的抗风险能力。

2.2 投资回收期

移动式余热利用项目的投资回收期计算式为:

$$-C_0 + \sum_0^{T_p} \frac{I_t - C_t}{(1+r)^t} = 0 \quad (4)$$

式中: T_p —动态投资回收期, a; I_t —系统运行第 t 年的收益, 万元; C_0 —系统的投资成本, 万元; C_t —系统

运行第 t 年的运行成本, 万元; r —折现率。

经计算, 折现率为 7%、10%、12% 和 15% 时项目在运行年限内的投资回收期如表 2 所示。

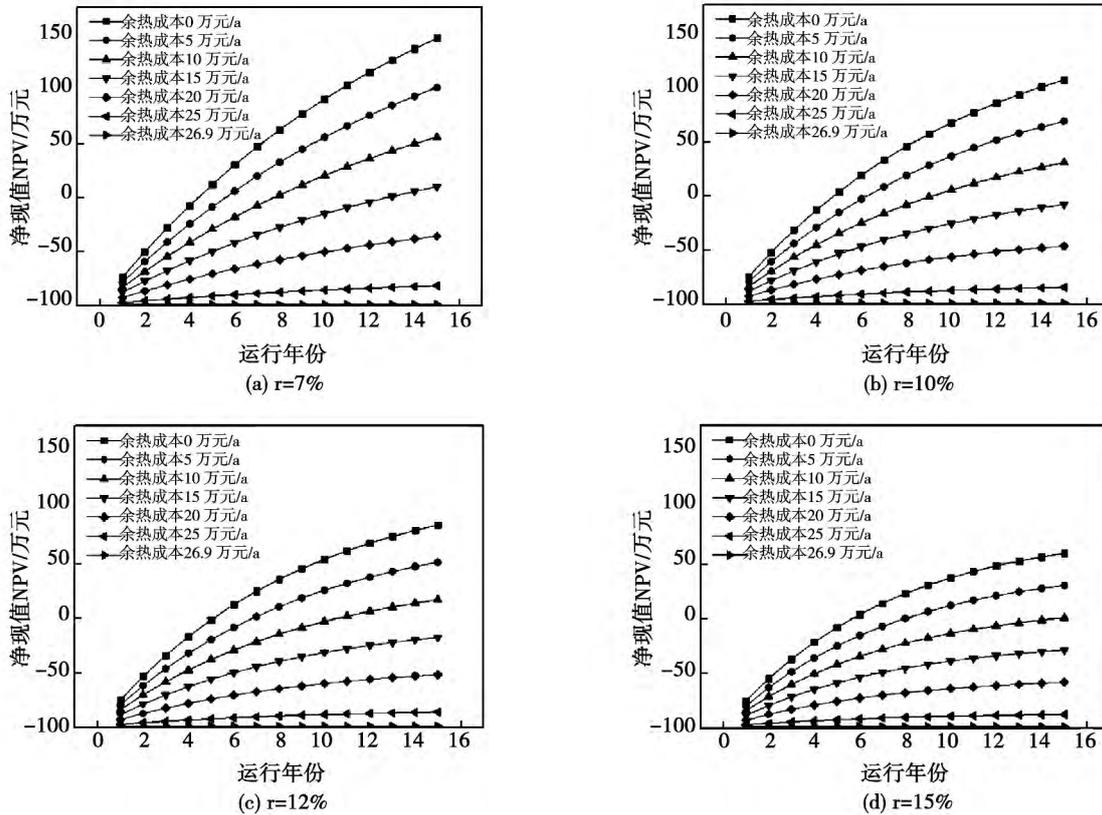


图 1 不同折现率情况下移动式余热利用系统在运行 15 年限内的 NPV 值

Fig. 1 Net present value of the movable type waste heat utilization system during the operation time limit of 15 years under the condition of various present discount rates

表 2 不同折现率情况下移动式余热利用系统在运行年限内的投资回收期

Tab. 2 Investment payback period of the movable type waste heat utilization system during the operation time limit under the condition of various present discount rates

余热成本 /万元·a ⁻¹	投资回收期/a			
	折现率 7%	折现率 10%	折现率 12%	折现率 15%
0	5	5	5	6
5	6	6	7	8
10	8	9	11	15
15	13	-	-	-
20	-	-	-	-
25	-	-	-	-
26.9	-	-	-	-

分析表 2 可以知道, 随着折现率和余热成本的提高, 系统的投资回收期越来越长。当余热成本大于 15 万元/a 时, 只有折现率取 7% 时可在第 13 年收回投资成本。更高的余热成本和折现率将使得该系统在经济上不可行。

3 敏感性分析

对于蓄热器充热时间、热源距离和余热价格这 3 种不确定性因素, 当其它两种取案例中的数值并固定不变时, 分别计算充热时间为 1、2、3、4、5、6 和 7 h, 热源距离为 5、10、15 和 20 km, 余热价格为 3、5、7、10 和 15 万元/a 时系统 NPV 值随时间的变化情况, 如图 2 - 图 4 所示。

从图2-图4中可以看出,为了保证项目在运行年限内收回成本,即运行15年时的NPV值大于零。案例中的3种不确定性因素变化范围分别为

1-6.5-15和3-12。计算3种不确定性因素变化范围内项目运行15年时系统的NPV值,计算结果如表3所示。

表3 不确定性因素变化时对应系统运行15年的NPV值

Tab.4 Net present value corresponding to the operation time of the system for 15 years when uncertainty factors are changing

不确定性因素	蓄热器充热时间/h						热源距离/km			余热价格/万元·a ⁻¹				
	1	2	3	4	5	6	5	10	15	3	5	7	10	12
NPV/万元	250	126	85	43	2	2	153	85	17	85	70	54	32	16

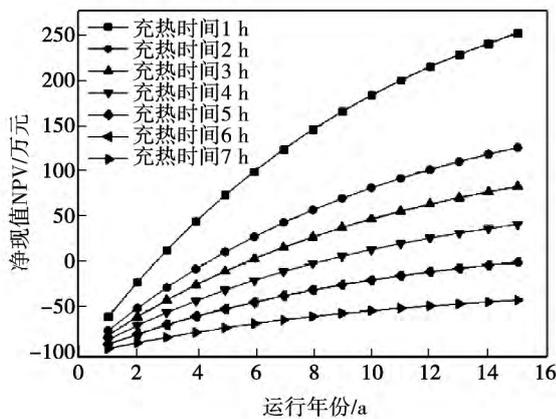


图2 不同充热时间的移动式余热利用系统净现值随时间的变化情况

Fig.2 Changes of the net present value of the movable type waste heat utilization system with time in various heat charging times

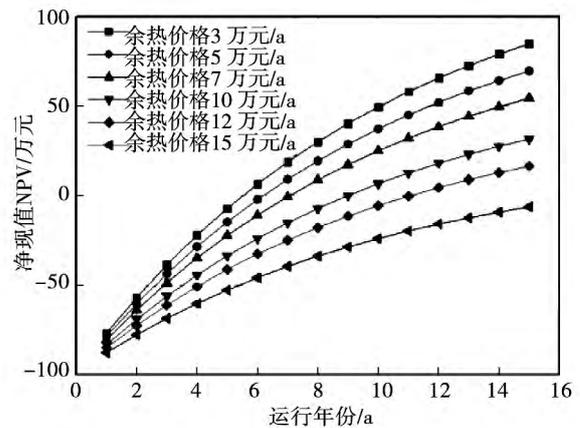


图4 不同余热价格的移动式余热利用系统净现值随时间的变化情况

Fig.4 Changes of the net present value of the movable type waste heat utilization system with time at various prices of the waste heat

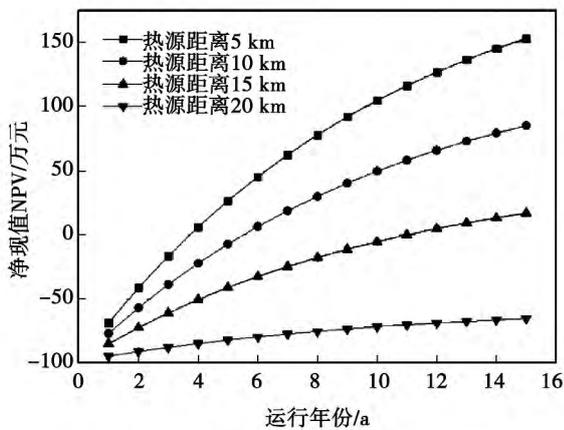


图3 不同热源距离的移动式余热利用系统净现值随时间的变化情况

Fig.3 Changes of the net present value of the movable type waste heat utilization system with time at various distances from the heat source

根据表4中的数据绘制敏感性分析图,如图5所示。

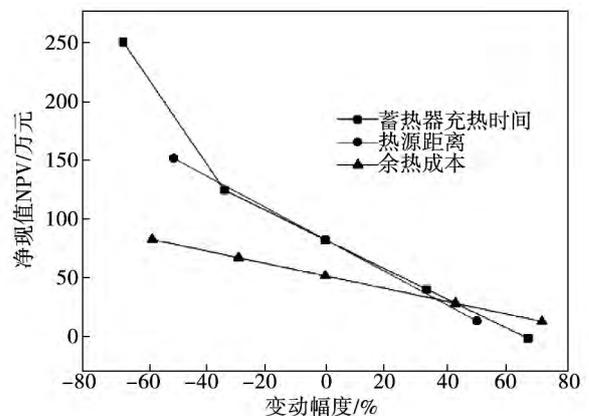


图5 移动式余热利用系统敏感性分析图 Fig.5 Chart for analyzing the sensitivity of the movable type waste heat utilization system

从图中可以看出,由于受到自身变化范围的影响,3种不确定性因素的变动幅度存在一定差距。然而,通过对比图中的3条曲线斜率可以看出,除了在-60%~-40%变动幅度内蓄热器充热时间的斜率大于热源距离斜率外,二者平均斜率基本一致,且均高于余热成本曲线的平均斜率。因此可以知道3种不确定性因素对项目经济性影响程度为:蓄热器充热时间 \approx 热源距离 $>$ 余热价格。

4 结 论

针对移动式余热利用系统的经济性进行了研究,对实际应用规模的系统进行了成本和收益估算,通过净现值、投资回收期这两个经济性指标对案例中系统的经济性进行了评价分析,对系统进行了敏感性研究。主要研究结论为:

(1) 对于文中的研究案例,当折现率为7%、余热成本低于15万元/年时,或折现率为10%、12%和15%、余热成本低于10万元/年时,移动式余热利用项目在系统运行年限内的净现值大于零。根据余热成本的不同,在折现率为7%、10%、12%和15%时的最长投资回收期分别为13、9、11和15a,表明满足上述条件时案例中的移动式余热利用项目在经济上是可行的。

(2) 经对案例中的项目进行敏感性分析可知,蓄热器充热时间、热源距离和余热价格3种不确定性因素对项目经济性的影响程度为:蓄热器充热时间 \approx 热源距离 $>$ 余热价格。

参考文献:

- [1] Fujita Y, Shikata I, Kawai A. Latent Heat Storage and Transportation System "Transheat Container". IEA/ECES Annex 18, the First Workshop and Expert Meeting. Tokyo, Japan, 13th - 15th November 2006.
- [2] Yukitaka K. Review of Japanese R&D Activity on Thermal Energy Transportation-Pre-questionnaire survey in Japan for Annex 18. Kick-Off Workshop of Annex 18. Bad Tölz, Germany, 14th November 2005.
- [3] Wang WL, Yan J, Dahlquist E, Nyström J. A new mobilized energy storage system for industrial waste heat recovery for distributed heat supply. International conference of applied energy, Hong Kong, January 5 - 7 2009.
- [4] Guo SP, Zhao J, Li X, et al. Experimental study on waste heat recovery with an indirect mobilized thermal energy storage system [C]. Perugia, Italy: International Conference on Applied Energy, 2011: 3035 - 3046.
- [5] 赤藻糖醇价格情况 [EB/OL]. [2014 - 06 - 20]. <http://china.makepolo.com/productdetail/100010528857.html>.
The price of erythritol [EB/OL]. [2014 - 06 - 20]. <http://china.makepolo.com/productdetail/100010528857.html>.
- [6] 钢材价格情况 [EB/OL]. [2014 - 06 - 20]. <http://www.zh818.com/html/2013/0404/5645476.aspx>.
The price of steel material [EB/OL]. [2014 - 06 - 20]. <http://www.zh818.com/html/2013/0404/5645476.aspx>.
- [7] 岩棉保温板价格情况 [EB/OL]. [2014 - 06 - 20]. <http://detail.china.alibaba.com/offer/914218786.html?cosite=e=tanx>.
The price of rock wool insulation board [EB/OL]. [2014 - 06 - 20]. <http://detail.china.alibaba.com/offer/914218786.html?cosite=e=tanx>.
- [8] 聚胺脂保温板价格情况 [EB/OL]. [2014 - 06 - 20]. <http://detail.china.alibaba.com/offer/338842048.html?spm=b2>.
The price of polyurethane insulation board [EB/OL]. [2014 - 06 - 20]. <http://detail.china.alibaba.com/offer/338842048.html?spm=b2>.
- [9] 玻璃钢箱体价格情况 [EB/OL]. [2014 - 06 - 20]. <http://www.c-shelter.com.cn/>.
The price of FRP containers [EB/OL]. [2014 - 06 - 20]. <http://www.c-shelter.com.cn/>.
- [10] 卡车重量情况 [EB/OL]. [2014 - 06 - 20]. http://www.360che.com/m11/2867_index.html.
The weight of trucks [EB/OL]. [2014 - 06 - 20]. http://www.360che.com/m11/2867_index.html.
- [11] 拖挂重量情况 [EB/OL]. [2014 - 06 - 20]. <http://detail.china.alibaba.com/offer/932234079.html>.
The weight of trailers [EB/OL]. [2014 - 06 - 20]. <http://detail.china.alibaba.com/offer/932234079.html>.
- [12] 公路运输运费情况 [EB/OL]. [2014 - 06 - 20]. <http://bbs.360che.com/thread-255085-1-1.html>.
The cost of road transportation [EB/OL]. [2014 - 06 - 20]. <http://bbs.360che.com/thread-255085-1-1.html>.
- [13] Guo SP, Li HL, Zhao J, et al. Numerical simulation study on optimizing charging process of the direct contact mobilized thermal energy storage [J]. Applied Energy, 2013, 112 (12): 1416 - 1423.
- [14] CJJ 34 - 2010 城镇供热管网设计规范 [S].
CJJ 34 - 2010. Design code for urban heating networks [S].
- [15] 项目的一般最大折现率情况 [EB/OL]. [2014 - 06 - 20]. <http://www.cas.org.cn/pgbz/xgwttljxgwx/qyjpzgdzyjxl/2734.htm>.
The maximum discount rate of a project [EB/OL]. [2014 - 06 - 20]. <http://www.cas.org.cn/pgbz/xgwttljxgwx/qyjpzgdzyjxl/2734.htm>.

(陈 滨 编辑)

移动式余热利用系统的经济性研究 = **Study of the Cost-effectiveness of a Mobile Type Waste Heat Utilization System** [刊 汉] GUO Shao-peng (College of Energy Source and Environment ,Inner Mongolia University of Science and Technology ,Baotou ,China ,Post Code: 014010) ,ZHAO Jun ,AN Qing-song ,GAO Wei (Education Ministry Key Laboratory on Low Temperature Thermal Energy High Efficiency Utilization ,College of Mechanical Engineering ,Tianjin University ,Tianjin ,China ,Post Code: 300072) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(5) . -465 -469

On the basis of a mobile type waste heat utilization test system being used as a reference ,performed were the cost and income estimation of a mobile type waste heat utilization system in a scale of practical applications. Through the two cost-effective indexes (net present value and investment payback period) ,the cost-effectiveness of the above-mentioned system was analyzed and studied. In addition ,in combination with the heat charging time ,distance from the heat source and waste heat prices etc. factors ,a sensitivity analysis of the project was made. It has been found that for the mobile type waste heat utilization project serving as the case being studied ,when the waste heat cost changes ,the net present values of the project in the years of the system in operation corresponding to the discount rate of 7% ,10% ,12% and 15% are bigger than zero. Under the condition of various waste heat costs ,the longest investment payback period at four discount rates will be 13 ,9 ,11 and 15 years respectively. The foregoing cost-effective indexes indicate that the mobile type waste heat utilization project serving as the case under investigation is feasible in terms of its cost-effectiveness. The extents of the heat charging time of the heat accumulator and the distance from the heat source influencing the cost-effectiveness of the project will be basically identical ,both greater than that of the waste heat price influencing the cost-effectiveness of the project. The foregoing cost-effectiveness study can offer reference and an underlying basis for making decisions of mobile type waste heat utilization projects.

Key Words: mobile type waste heat utilization ,cost-effectiveness ,sensitivity analysis

超临界机组一次调频对汽轮机动态热力特性的影响 = **Influence of the Primary Frequency Modulation of a Supercritical Unit on the Dynamic Thermal Characteristics of Its Steam Turbine** [刊 汉] LI Fu-shang (Shandong Electric Power Research Institute ,Jinan ,China ,Post Code: 250000) ,WANG Xu-rong ,DAI Yi-ping (College of Energy Source and Power Engineering ,Xi'an Jiaotong University ,Xi'an ,China ,Post Code: 710049) ,ZHANG Ya-fu (Xi'an Thermodynamics Research Institute Co. Ltd. ,Xi'an ,China ,Post Code: 710032) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(5) . -470 -476

A mathematical model was established for supercritical units and their control systems ,a software for calculating the off-design condition characteristics of the units was programmed and the law governing the influence of the primary