

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.01.009

大型空调系统生命周期评价与能源利用评价模型

王豆豆¹, 苟立¹, 张彬²

(1. 西安建筑科技大学 建筑环境工程与空调技术研究所, 西安 710055;

2. 中国兵器工业第二〇五研究所, 西安 710065)

摘要:基于西安咸阳国际机场货运中心空调系统,利用生命周期理论和层次分析法针对能源高效利用途径进行了研究。针对生命周期方法和层次分析法应用于建筑能源进行了深入分析,结合实际案例数据进行了生命周期清单分析,数据来源与所提模型紧密结合,基于层次分析法框架性模型,以空调工程各种资源的消耗值和各种环境影响潜值分析为例,量化剖析了如何利用全生命周期影响评价对耗能项目进行评价。结合案例数据的生命周期评价提出了能源利用评价层次模型,并针对模型给出了从全生命周期角度调整建立能源利用过程监控与评价等建议。

关键词:大型空调系统;生命周期;评价方法;能源利用;层次分析法

中图分类号:TU831.3;TK018 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)01-0047-08

Life cycle assessment in large air-conditioning system and evaluation framework model of energy utilization

Wang Doudou¹, Gou Li¹, Zhang Bin²

(1. Institute of Built Environment Engineering and Air Conditioning Technology, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055 P. R. China; 2. No. 205 Research Institute of China Ordnance Industries, Xi'an 710065, P. R. China)

Abstract: Based on central air conditioning system of Xi'an-Xianyang international airport, energy efficient utilization with life cycle theory and analytic hierarchy process was conducted. Firstly, the application of life cycle and analytic hierarchy process to building energy was deeply studied. Secondly, life cycle inventory analysis was conducted combined with the practical cases data. And the data resource is related to the proposed model. Thirdly, On basis of analytic hierarchy framework model and analysis of energy consumption as well as potential environmental impact on air-conditioning project, the study on how to evaluate energy-consumption project with the use of life cycle impact assessment is done. Based on the life cycle assessment of practical cases data, a new hierarchical evaluation model of energy utilization is put forward. And in view of the model, several suggestions are given such as establishing energy utilization process monitoring and evaluation from the point of whole life cycle assessment. This provides a theoretical basis for policies about enormous quantity of building energy and energy saving of air conditioning system.

Key words: large air conditioning system; life cycle; evaluation methodology; energy utilization; analytic hierarchy process

收稿日期:2014-05-08

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划(2011BAJ03B03)

作者简介:王豆豆(1989-),女,主要从事环境与资源保护研究,(E-mail)doudouwangsmile@sina.com。

Received:2014-05-08

Foundation item: National Science and Technology Supporting Program(No. 2011BAJ03B03)

Author brief: Wang Doudou (1989-), main research interest: environment and resources protection, (E-mail) doudouwangsmile@sina.com.

能源的开发使用为社会进步、经济发展提供了源源不断的动力,是人类一切活动的物质基础^[1]。但随着经济快速增长和能源过度使用^[2-3],能源资源缺乏^[4]、结构不合理、环境污染严重及能源分配不公等问题日益突出。以建筑暖通空调系统能耗为例,其消耗的能源约占建筑总能耗的 50% 左右。因此,制定合理的能源政策、调整能源结构及能源利用机制、开发利用可再生能源^[5]、采用综合性的能源评价观代替传统单一的能源评价观、机制与政策受到高度重视^[6-8]。

目前,能源、资源及环境管理评价常用的分析方法有技术经济分析法^[9]、层次分析法^[10]、情景分析法、价值分析法、灰色分析法^[11]等。作为常用的评价方法之一生命周期评价理论产生经过了萌芽、探索和迅速发展 3 个阶段^[12-13],已形成一套完整的理论体系,并逐渐被接受。生命周期评价在生物能源利用与评价^[14]、太阳能建筑设备系统的评价^[15]、现代化农业技术与实践^[16]等诸多方面都得到了广泛的研究与应用。一些研发公司也在其产品研发方面也应用生命周期评价理论来进行技术系统评价。然而,具有针对性的生命周期方法和层次分析法应用于建筑能源分析,特别是结合实际案例数据进行生命周期分析尚有待于进一步研究。有鉴于此,作者基于层次分析法提出的框架性模型,以空调工程各种资源的消耗值和各种环境影响潜值分析为例,量化剖析了利用全生命周期影响评价对耗能项目的评价过程。通过西咸国际机场货运中心空调工程的资源耗竭系数和环境影响负荷的计算,深入例剖析如何利用全生命周期影响评价对耗能项目进行评价,并运用层次分析法构建能源利用评价层次模型。

1 生命周期评价模式

国际环境毒理与环境化学学会(SETAC)和国际标准化组织(ISO)的定义^[17],生命周期评价的对象可以是一个产品、处理过程或活动,并且范围涵盖了评估对象的整个生命周期;其核心要素是对产品(广义“产品”)从原材料采集、生产、使用、产品制造直至报废弃用的全生命周期过程中的资源(包括能源)的消耗情况及对各类环境因素可能造成影响进行清单式分析,评判预测结果,提出结论性意见,进而为工业产品的设计、耗能及能源系统的优化提供

改进理论依据。以 ISO14040、ISO14041 以及 ISO14042 等标准为例,生命周期评价(LCA)方法将其分为 4 步:

- 1) 目标与研究范围定义(Goal and Scope Definition);
- 2) 能源及排放清单分析(Life Cycle Inventory Analysis, LCI);
- 3) 生命周期影响评价(Life Cycle Impact Assessment, LCIA);
- 4) 结果解释与改善评价(Life Cycle Interpretation),其内涵关系如图 1^[12,18]。

依据 SETAC 和各类 ISO 中的框架,生命周期评价模型包括循序渐进的 4 个技术步骤^[12]:

- 1) 科学目标和范围定义,对计算资源能源消耗及环境排放潜值进行;
- 2) 清单归类分析,对计算数据进行标准化;
- 3) 标准化数据的加权。根据重要性分级,对各项潜值赋权,评价其综合大小;
- 4) 以“人当量”为单位对赋权结果计算资源耗竭系数和环境影响负荷及其效果分析。

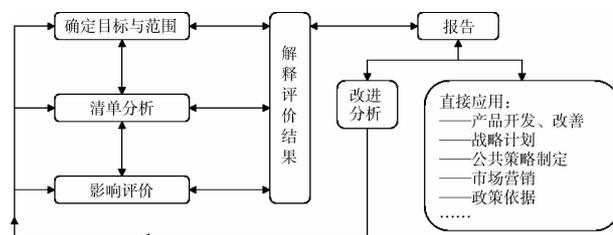


图 1 LCA 技术框架图

Fig. 1 ICA technology frame

2 研究对象与范围界定

2.1 研究对象

为深入探讨生命周期评价(LCA)理论方法、生命周期评价模型研究更具有典型性,以西安市的典型能源利用重大项目——西咸国际机场货运中心空调工程作为范例进行生命周期的清单分析。该货运中心建筑总面积为 18 700 m²,其中有 15 000 m² 为空调面积,该空调系统中,冷源由两台螺杆制冷机组成的蓄冰系统集中供给,热源采用锅炉房蒸汽,经过减压换热最终形成 60/50 °C 的热水^[19]。

2.2 数据来源

生命周期清单分析是基于西咸国际机场货运中心空调工程的实际状况、空调系统机组部分运行及

能耗数据进行^[19]。管道耗材与环境排放的数据来源于国家环保局编制的工业污染物产生和排放系数手册和中国钢铁工业协会编制的《中国钢铁工业年鉴》^[20-23]。考虑西咸国际机场货运中心空调工程能源实际使用情况,所有电能的生产方式均为火力发电。实际工程建设表明,生产工艺过程中产生的边角料和各种废弃物在生产以外的回收再利用的经济价值以及对于资源能源消耗总量的影响所占比例不高,可忽略不计。按照集中空调系统生产、使用规范标准,结合西咸国际机场货运中心空调实际案例数据进行生命周期分析。本文所用的基础数据都来源于工业和能源方面常用的手册和资料,工程数据来源于西咸国际机场货运中心空调系统实际案例。

2.3 研究范围

鉴于研究大样本数据数量获得的困难性,为了方便模型建立及分析,往往将这一复杂系统做科学、合理的简化或假设。在本研究中,计算及分析时将空调系统划分成有单独边界的两个独立系统——机组系统(即产能系统)和管道系统(即输配系统及用能系统),并分别对其资源能源消耗和环境影响量值进行研究。研究范围确定以系统边界的形式给以界定。对于机组部分,主要对系统在使用阶段的能源、资源消耗程度及环境排放量进行分析计算和研究,系统边界如图 2 所示。而管道部分即输配系统中的各种管件及其部件都属于生产消耗大于使用及运行消耗的情况,对此主要研究钢材及管道在生产阶段的能源资源消耗和环境排放量,系统边界如图 3 所示^[19]。

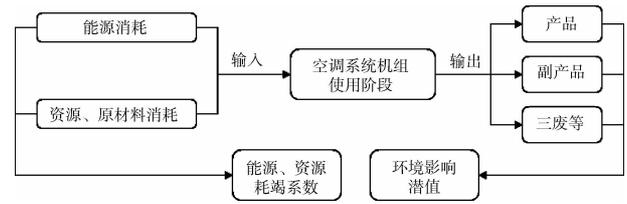


图 2 大型空调系统机组部分系统边界

Fig. 2 Systematic boundary of lenit system on large air conditioning system

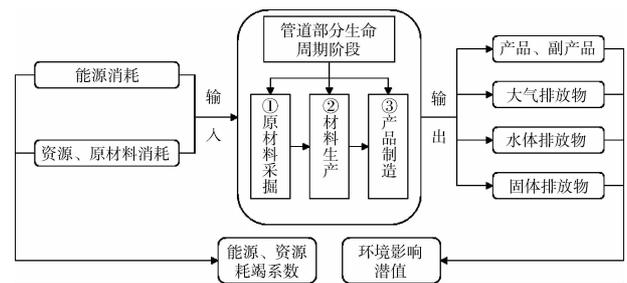


图 3 大型空调系统管道部分生命周期的系统边界

Fig. 3 Systematic boundary of piping system life cycle on large air conditioning sytem

3 能耗及环境排放清单分析

3.1 机组部分

3.1.1 能耗调研 能耗分析清单应逐项进行。西咸国际机场货运中心空调工程清单主要分两部分:1)空调系统中所有耗能设备的型号、功率以及全年运行情况等基本资料。2)机组全年各项能耗。结果见表 1。

表 1 能耗调查表

Table 1 Survey of energy consumption

调查项目	相关参数及调查数据	统计结果
冰蓄冷系统设备功率	共计 23 台设备	总功率为 346.5 kW
全年运行情况	系统及机房夏季运行 132 d, 冬季运行 121 d, 每天 8 h。	
冰蓄冷用电统计 ^[11]	峰时 92 550 kW·h; 谷时 140 400 kW·h; 正常 167 700 kW·h	共计耗电 400 650 kW·h
冬季采暖热源能耗	市政热网, 平均蒸汽消耗量为 1 426 t, 换算为标准煤热量	共计能耗 4 537 178.95 MJ
冬季采暖水泵耗电量	水泵日均耗电量 855 kW·h, 年运行 121 d	共计耗电 103 455 kW·h
空调末端耗电量	末端设备日均耗电 238.664 kW·h, 冬季运行 86 d, 夏季运行 88 d	共计耗电 41 527.54 kW·h
合计(全年)	空调系统耗电量合计为 545 633 kW·h, 热源能耗为 4 537 178.95 MJ	

3.1.2 清单分析 根据西咸国际机场货运中心空调系统全年耗电量进行清单分析。空调机组系统使用阶段能源消耗及主要环境排放物清单以及所研究的机组部分的能耗和环境总排放列于表 2 中^[12]。

3.2 管道部分

为统计空调系统风管、水管用量,结合设计图纸实地考察,结果如表 3^[18]。

3.2.1 能源消耗清单 能源消耗清单应考虑生产过程涉及的几个部分。该空调系统管道部分全生命

周期中的能源消耗分为钢材生产和管道制作两个过程。钢材生产主要依靠的是电、燃油和煤等的消耗。风管、水管制作过程主要消耗的是电能。中国生产 1 kg 普通钢材的能耗、风管生产过程能耗(以长 2 m, 横截面积为 800 mm×630 mm 规格, 厚度为 0.75 mm 的风管作为标准风管), 分项统计汇总换算得到总能耗为 160.632 MJ/根^[12]。水管生产过程能耗参照文献^[20]。总能耗清单见表 4。

表 2 机组部分能源消耗及总排放量清单
Table 2 Energy consumption and total emissions list of unit system

能源类型	1MJ 电力的能耗/MJ	电的消耗量/MJ	总能耗/MJ	环境排放物分类	1MJ 电力的排放/g	总排放/kg
原煤	0.327	1 964 278.8	642 319.17	粉尘	2 652	5 209.27
洗煤	0.81	1 964 278.8	1 591 065.83	CO ₂	317 000	622 676.38
燃油	0.006 98	1 964 278.8	13 710.67	SO ₂	2 865	5 627.66
原油	0.002 1	1 964 278.8	4 124.99	NO _x	1 449	2 846.24
柴油	0.009 6	1 964 278.8	18 857.08	CO	770	1 512.49
焦炉气	0.012 8	1 964 278.8	25 142.77	COD	8.636	16.96
天然气	0.000 164	1 964 278.8	322.14	灰	0.008	15 714.23
标准煤			4 537 178.95	渣	0.004 72	9 271.40
合计			6 832 721.58			662 874.6

表 3 管道用量统计表
Table 3 Statistics pipeline amount

管道类型	长度/m	尺寸/mm	体积/m ³	用量/kg	表面积/m ²
风管	1 802.901	厚度 1.2~0.5	2.902	22 840.111	3 727.385
水管	3 217.214	口径 15~200		17 854.663 24	
合计	5 020.115			40 695	

注:表中薄钢板的容重按 7 870 kg/m³

表 4 管道部分能源消耗清单
Table 4 Energy consumption list of pipeline

能源类型	生产 1 kg 普通 钢材能耗/MJ	风管制作 总能耗(MJ·根 ⁻¹)	水管制作 总能耗/MJ	管材消耗量/kg	能耗合计/MJ
电	15.28	113 061.6	145 433	风管 22 840;水管 17 855	880 314.2
燃油	3.37				137 142.15
煤	37.99				1 546 003.1
合计	56.64			40 695	2 563 459.4

从各项能源的消耗上看,消耗最多的是煤炭,这也符合中国的能源结构。

3.2.2 材料消耗清单 西咸国际机场货运中心空调系统管道部分的资源消耗主要是生产过程中的各类钢材的使用。钢材生产过程中主要的原材料及辅

助用料的消耗见表 5(以 1 kg 普通钢材为单位),各类管道安装时需要使用的钉子、法兰、管接头等的用量已考虑在内^[12]。据此,根据文献[18]中的计算结果,管道部分资源消耗列于表 5。

表 5 管道部分主要资源消耗清单^[18]
Table 5 Source consumption list of pipeline

原材料名称	单位消耗量/g	总消耗量/kg	原材料名称	单位消耗量/g	总消耗量/kg
生铁	1 500	61 042.5	铁锰矿	24	976.68
石灰石	1 700	69 181.5	白云石	14	569.73
氧	680	27 672.6	氟石	13	529.035
原油	150	6 104.25	水	34 000	1 383 630

3.2.3 环境排放清单 西咸国际机场货运中心空调系统环境排放包括了两部分,生产管材所用电能在生产过程中的排放和钢材生产过程中的排放。电

能在生产过程中的排放参考表 2 的数据,管道生产过程电能消耗总量查表 4,将两部分排放量相加列于表 6。

表 6 管道系统总排放量
Table 6 Total emissions of piping system

环境排放物分类	污染物	生产 1 kg 钢材排放量/g	生产管道钢材产生的总排放量/kg	生产电能产生的总排放量/kg	排放量总计/kg
废气排放	CO	110	4 476.45	677.84	5 154.29
	CO ₂	8 200	333 699	279 059.6	612 758.6
	SO _x	51	2 075.445	2 522.1	4 597.545
	NO _x	16	651.12	1 275.58	1 926.7
	碳氢化合物	1.9	77.320 5		77.320 5
	甲烷	18.008	732.836		732.836
	H ₂ S	0.087	3.540		3.54
	HCL	0.874	35.567		35.567
排入水体的污染物	悬浮物	120.54	4905.38		4 905.38
	NH ₄	0.99	40.288		40.288
	COD	0.282	11.476	7.6	19.076
	BOD	0.005	0.2035		0.203 5
	酚	0.005	0.2035		0.203 5
固体废弃物	Na ⁺	0.38	15.464		15.464
	矿渣	3 980	161 966.1	0.004	161 966.1
	工业混合固废	870	35 404.65		35 404.65
	粉尘、灰尘	295	12 005.025	2 334.59	14 339.62

通过分析各排放物来源,了解到 CO₂ 主要来源于管道系统耗材的生产,占 54.5%,其次是工艺过程(电能消耗),占 45.5%。其它排放物(如和 SO_x)也有类似情况。因此,降低钢材生产燃料耗费和工艺中电能的消耗是减少 CO₂、CO 等主要废气的重要途径,即需要通过系统设计方面的改进和生产工艺技术的改进,使得管道耗材量和生产耗电量降低。水体污染物主要是悬浮物,占有排入水体污染物的 98.5%,从来源看,主要来源于钢材生产。固体废弃物量也相当大,从来源看,工艺过程的矿渣量占固体废弃物总量的 76.5%,且几乎 100%的矿渣都来源于钢材生产过程。如何控制钢材生产过程中矿

渣排放以及回收处理和再利用是值得注意的问题。

4 生命周期影响评价

为了直观表示西咸国际机场货运中心空调系统生命周期内对资源及环境的影响,要对清单分析结果进行影响评价,得到资源耗竭系数以及环境影响负荷,并分析评价结果。资源与能源的利用主要涉及油及电的消耗,把能源消耗量(电能)合并到资源消耗量中,综合为资源耗竭系数,将所有环境排放物综合统计为环境影响负荷,根据本系统特点^[12],该空调工程生命周期影响类型见表 7。具体的标准化基准的选定和单位见表 8,影响评价计算结果见表 9。

表 7 西咸国际机场货运中心空调系统生命周期影响类型^[12]

资源耗竭	(将能源耗竭也换算到资源耗竭中)	全球性
环境影响潜值	全球变暖(GW)	全球性
	酸化(AC)	地区性
	富营养化(NE)	地区性
	固体废弃物(BW)	局地性
	烟尘和灰尘(SA)	局地性

表 8 西咸国际机场货运中心空调系统生命周期评价计算基准

Table 8 Calculation standards of life cycle assessment

计算参数	基准化标准 ^[12]	权重确定 ^[12]	单位
资源耗竭系数	1990 年全球人均消耗量	依据资源可供应时长和总量确定	标准人当量
环境影响负荷	1990 年全球总排放量与总人口数之比	采用目标控制法确定(1990 年数据与 2000 年数据之比)	标准人当量

表 9 西咸国际机场货运中心空调系统生命周期评价计算结果

Table 9 Calculation results of life cycle assessment

计算参数	资源耗竭系数/人当量	环境影响负荷/人当量
机组部分	$2\ 448.59 \times 10^{-3}$ (能源消耗为主)	1 078.32
管道部分	619.42×10^{-3} (资源消耗为主)	62.36
合计	$3\ 068.01 \times 10^{-3}$	1 140.68

从表 9 看出,在资源耗竭方面,西咸国际机场货运中心空调系统运行过程占据了整个生命周期资源(能源)消耗的 79.8%;在环境排放方面,空调运行阶段占据了整个生命周期环境排放负荷的 94.5%。因此,在这一类典型耗能项目的管理过程中,除了适当改进生产及工艺(即管道部分)过程的技术手段,降低生产过程中的能源消耗外,对于降低资源能源消耗和减少环境污染排放的需要,还是应该考虑使用过程中阶段(机组部分)的管理方法与技术的改进。

5 能源层次评价模型

按照层析分析法的思路,以西咸国际机场货运中心空调系统生命周期评价为范例,建立全新的能源利用层次评价模型,并进行一致性检验及分析。该模型的来源主要借鉴了机电产品的评价方法和汽车产品的层次模型结构,所做的改进是将生命周期评价的结果——资源耗竭系数和环境影响负荷作为重要的评定指标,结合能源项目的特点对模型结构进行更新,对能源利用过程按照全生命周期进行划分,建立层次结构模型。西咸国际机场货运中心空调系统研发与评价采用层次分析法构建一种四层次的评价模型^[22]。从环境影响指标、技术指标和经济指标三个角度出发分析^[23]。将西咸国际机场货运中心空调系统能源利用过程的全生命周期分为产品加工生产、能源利用(实际工程项目)、工程项目的报废阶段。目标层为能源利用评价;准则层分为环境属性、资源能源属性、经济属性和技术属性;在子准则层中将所有环境属性合并为环境影响负荷(生命周期评价结果),将一部分资源能源属性合并为资源耗竭系数(生命周期评价结果);最底层是方案层,分列各种能源利用方案。具体层次结构划分如图 4 所示。其中需要说明的是,模型评价指标均来自于对

空调系统整个生命周期的资源能源消耗和环境影响的调查计算所得,所选取的指标也在环境属性、资源能源属性以及经济技术属性等方面比较有针对性。例如,环境影响负荷这一生命周期参数主要体现了空调系统在整个生命周期内对于环境造成的影响,可以较为完整的代表环境属性;生命周期内的设备利用率是反映空调系统整个生命周期内所有涉及到的设备整体的综合利用情况的参数,可以体现模型中经济属性的部分。其他模型指标也类似。

建立构造各层次所有的判断矩阵,准则层 B 判断矩阵为 A ;子准则层 C 中,包涵 8 个元素,对应其上层元素分别构建判断矩阵。环境属性只有一个元素。资源能源属性、经济属性和技术属性都有两个以上元素,对其构建比较矩阵为 B_2 、 B_3 、 B_4 ,原则还是通过专家的比较意见以及对各元素的打分情况。分别计算判断矩阵的层次单排列,即计算判断矩阵最大特征值对应的归一化后的特征向量,并进行一致性检验,得矩阵 A 、 B_2 、 B_3 、 B_4 的 CR 均 ≤ 0.1 ,判断矩阵的一致性。

基于西咸国际机场货运中心空调系统这一典型能源消耗工程全生命周期评价的剖析过程,从全生命周期的角度出发,按照层次分析法对能源利用过程的诸多因素进行了归类分层,在使用过程中,针对一种或者一组能源的利用,按照其全生命周期过程,对从勘探生产到工程报废所有生命周期重要阶段均按照该模型层次进行评价,通过进行生命周期影响评价及经济、技术评价,得到准则层 C 的所有指标,参考全生命周期的资源耗竭系数和环境影响负荷最终对类似于西咸国际机场货运中心空调系统这样的能源利用工程随时进行管理方法与技术的改进,优化能源利用项目全生命周期的运行,为能源利用的合理性评价提供理论依据。

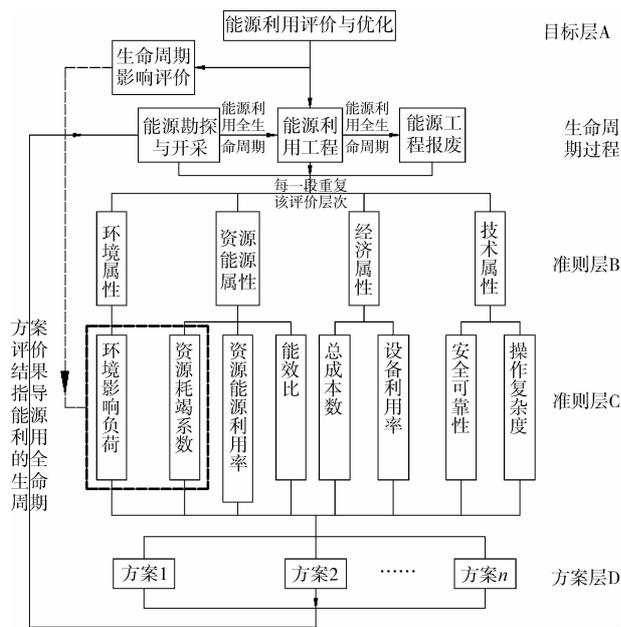


图 4 基于西咸国际机场货运中心空调系统的能源利用层次评价模型

Fig. 4 Hierarchical evaluation model of energy utilization based on central air conditioning system of Xi'an-Xianyang international airport

6 结论

通过生命周期方法进行能源消耗项目——西安咸阳国际机场货运中心空调工程案例剖析,建立了新的能源利用层次评价模型。通过空调工程各种资源消耗值和环境影响潜值案例分析,明确了利用全生命周期影响评价量化剖析耗能项目的方法。并从全生命周期的角度为能源市场和可再生能源政策的制定提出建议。

1)在能源的勘探与开采阶段,加大模型环境和技术属性的评判权重,确保较小的环境影响负荷;在资源耗竭系数方面,针对每一种能源资源制定长期(几十年甚至更远)的开采计划,确保合理的资源耗竭系数。在能源利用项目实施过程,加大模型中资源能源属性及经济属性的权重。对典型的耗能项目按其资源能源属性及经济属性评估,确立优先采用的能源类型。在工程报废阶段,加大模型中环境、资源能源属性的权重。通过对环境影响负荷等准则层C中的参数进行计算评估,确定各种耗能项目合理的报废年限。

2)某种能源和可再生能源的利用过程中,不仅看某一过程是否符合环境和资源等要求,应该按照能源利用层次评价模型,从全生命周期角度出发,建立长效的监控机制,对整个能源生命过程参照上述

工程范例从勘探开采、实施利用以及报废的整个过程进行生命周期影响评价,并随时进行管理方法与技术的改进,优化能源利用项目全生命周期的运行。

参考文献:

- [1] 中国大百科全书出版社编辑部. 能源百科全说[M]. 北京:中国大百科全书出版社,1997.
- [2] José G, Luiz T. The decline of sectorial components of the world's energy intensity [J]. Energy Policy, 2013, 54:62-65.
- [3] Christof R, Paul A, Julian F, et al. Economic development and the demand for energy: A historical perspective on the next 20 years [J]. Energy Policy, 2012,50:109-116.
- [4] 童瀛. 中国能源安全现状问题及对策浅析[J]. 能源与节能,2013(11):16-17.
Tong Y. On the situation and problems of China's energy security and the countermeasures [J]. Energy and Energy Conservation,2013(11):16-17. (in Chinese)
- [5] Andreas Schäfer. Structural change in energy use [J]. Energy Policy,2005,33:429-437.
- [6] Jawaher A, Bassam A. Strategies and policies from promoting the use of renewable energy resource in the UAE [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013,26:660-667.
- [7] Parsoon A, Hamidreza K. Economical-environmental evaluation of natural gas and renewable energy systems [J]. Energy Research,2013,37(12):1550-1561.
- [8] Fawwaz Z, el Karmi, Nazih M, et al. The role of financial incentives in promoting renewable energy in Jordan [J]. Renewable Energy,2013,57:620-625.
- [9] 魏新荷. 集中式空调系统冷热源方案技术经济分析[J]. 城市建筑,2013(16):275.
Wei X H. Technical economic analysis of the cold and heat source scheme of centralized air conditioning system [J]. Urbanism and Architecture,2013(16):275.
- [10] Salman A, Razman M. Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of malaysia [J]. Renewable Energy,2014,63:458-466.
- [11] 娄伟,李萌. 基于 SEE-2R 模型的可再生能源开发的可持续性评价[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(6):34-40.
Lou W, Li M. The sustainability evaluation of renewable energy development based on SEE-2R model [J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(6):34-40. (in Chinese)
- [12] 杨建新,徐成,王如松,等. 产品生命周期评价方法及应

- 用[M].北京:气象出版社,2002
- [13] Curran M A. Broad-based environmental life cycle assessment [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, 27(3):430-436.
- [14] Stefan M, Edeltraud G. A systematic review of bioenergy life cycle assessments [J]. *Applied Energy*, 2013, 112(Sup1):257-277.
- [15] Sara E, Catherine H, Annelore K, et al. Life cycle impact assessment of a solar assisted heatpump for domestic hot water production and space heating [J]. *Energy Procedia*, 2014(48):813-818.
- [16] Ramez S, Vincenzo V, Gianluigi C. Optimization of organic and conventional olive agricultural practices from a life cycle assessment and life cycle costing perspectives [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014 (70):78-89.
- [17] ISO. International Organization of Standardization 14040—environmental management—life cycle assessment—principles and framework Geneva [S]. International Organisation for Standardization, 1999, 14040.
- [18] 张彬. 空调系统生命周期评价[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2010
- [19] 张启, 付保疆, 赵巨. 蓄冰空调在西安咸阳国际机场货运中心大楼的应用[C]//2004年陕西省制冷学会学术年会会议论文集, 2004.
- [20] 那树人. 炼铁计算[M]. 北京:冶金工业出版社, 2005.
- [21] 李兆坚. 可再生材料生命周期能耗算法研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2006, 14(1):50-58.
Li Z J. Study on calculation method of life cycle energy consumption for recyclable materials [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2006, 14(1):50-58. (in Chinese)
- [22] 国家环境保护局科技标准司. 工业污染物产生和排放系数手册[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2003.
- [23] 中国钢铁工业协会. 中国钢铁工业年鉴 2011[M]. 北京:中国钢铁工业年鉴编委会, 2011.
- [24] Bongjin G, Jong W K. Multi-criteria evaluation of hydrogen storage systems for automobiles in Korea using the fuzzy analytic hierarchy process [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014 (available online):1-7.
- [25] 王晓伟, 李剑峰, 李方义, 等. 机电产品生命周期评价指标与量化方法研究[J]. *山东大学学报:工学版*, 2009, 39(5):73-78, 114.
Wang X W, Li J F, Li F Y, et al. A life cycle assessment indicators system and quantification methods of electromechanical products [J]. *Journal of Shandong University: Engineering Science*, 2009, 39(5):73-78, 114.

(编辑 王秀玲)

(上接第 39 页)

- [10] Wei M Y, Li H Y, Wu Y J, et al. Performance of finned tube heat exchangers operating under frosting conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(5):871-877.
- [11] Liang X, Chan M Y, Deng S M, et al. Analytical solutions for evaluating the thermal performances of wet air cooling coils under both unit and non-unit Lewis factors [J]. *Energy Conversion and Management*, 2010, 51:2079-2086.
- [12] Threlkeld J L. *Thermal environmental engineering* [M]. 3rd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1998: 288-331.
- [13] Ren C Q, Yang H X. An analytical model for the heat and mass transfer processes in indirect evaporative cooling with parallel/counter flow configurations [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49:617-627.
- [14] 钱泰磊, 吴佳菲, 朱冬生, 等. 闭式冷却塔空冷传热性能的试验研究及优化运行[J]. *流体机械*, 2013, 41(6):70-73.
Qian T L, Wu J F, Zhu D S, et al. Experimental investigation of heat transfer and energy-saving operation of an air-cooled closed circuit cooling tower [J]. *Fluid Machinery*, 2013, 41(6):70-73. (in Chinese)
- [15] 章熙民, 任泽霈, 梅飞鸣. 传热学[M]. 5版. 北京:中国建筑工业出版社, 2007:268-270.

(编辑 王秀玲)