

The Investment Risk Analysis of the Wind Power Project Based on the Interpretative Structure Model

Moyu Wang, Jiaojiao Zhang, Xiaoliu Shen

Department of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing
Email: zijnewday123@126.com

Received: Mar. 17th, 2015; accepted: Mar. 21st, 2015; published: Mar. 27th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

Abstract

The paper uses the theory of whole life cycle analysis of wind power project investment risk, uses the interpretative structural model to analyze the risk factors of the wind power in China, constructs a hierarchical graph of risk factors, describes the hierarchy of wind power project investment risk and the relationship between risk factors, determines the source of risk, process risk and terminal risk of wind power project investment risk in China and puts forward the corresponding risk control methods.

Keywords

The Whole Life Cycle, Wind Power Project, Interpretative Structural Model, Risk Analysis

基于解释结构模型的风电项目投资风险分析

王默玉, 张娇娇, 申晓留

华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京
Email: zijnewday123@126.com

收稿日期: 2015年3月17日; 录用日期: 2015年3月21日; 发布日期: 2015年3月27日

摘要

本文利用全寿命周期理论分析风电项目投资的风险，并用解释结构模型对我国风能发电的风险因素进行解析，构建了风能发电项目风险因素的阶层结构图，阐述了风能发电项目风险因素的层级关系及风险因素间的相互关系，对我国风能发电的源头风险、过程风险和终端风险因素进行确定，并提出相应的风险控制方法。

关键词

全寿命周期，风电项目，解释结构模型，风险分析

1. 引言

资源环境问题的日益严峻，科学技术的迅速发展，能源的利用范围也在逐年扩大，发展可再生能源是解决发电产业节能减排的必由之路[1]。中国作为世界化石能源消耗的主要国家，在面对严峻环境污染的情形下，在风能资源丰富的背景下[2]，风电项目投资的兴起具有重要意义，但众多的项目投资如何确保其质量，在追求投资收益最大化的同时如何降低和规避风险也是极其重要的课题。

对风能发电项目投资风险的研究不仅可以丰富项目投资风险理论在风能领域的应用理论研究，而且可以优化能源投资结构，避免资源浪费，提高投资效率，从而促进发电产业的良好发展。

本文从风能发电的生命周期着手，总结了风能发电生命周期中可能面临的风险因素，进一步利用解释结构模型分析风险因素之间的相互关系，实现了对风能发电风险因素的层次认识和系统管理。

2. 基于全寿命周期的风能发电风险指标体系

2.1. 全寿命周期

全寿命周期管理起源于英国人 A. Gordon 在 1964 年提出的全寿命周期成本理论，是从项目的长期经济效益出发，通过一系列的技术、经济、组织措施，对项目的规划、设计、建设、安装、调试、运行、维护、改造、更新、报废的全过程进行全面管理，并对全过程发生费用进行控制，使寿命周期费用最小的一种管理理念。

从风险管理的角度来看，项目风险分布于项目决策、设计、建设、运营以及报废回收阶段，不同时期存在的风险不同具有的风险特征也不同。引入全寿命周期管理的理念，对项目的潜在风险按生命周期进行分析，有助于识别项目不同阶段风险发生的可能性，从而在相应阶段做出有针对性的管控措施。

图 1 是项目全寿命周期风险管理的阶段内容划分。

2.2. 风电项目投资风险评价指标体系

从我国国情出发，对风险投资项目的风险评估，应该能够科学、全面、客观和公正地反映其真实的内涵。目前已有部分文献对风险指标体系进行研究，尝试建立各种适合我国国情风险投资的风险评估的指标体系。

评价指标的选取应从风力发电系统现状及存在的主要问题出发，围绕风力发电系统综合评价的特点和需求进行。评价指标体系是风力发电系统综合效益状况的具体化描述，评价指标可以是定性的或量化的[3]。

通过参考文献[4]利用全寿命周期理论对风能发电投资的风险进行的总结和划分，再结合我国风能发

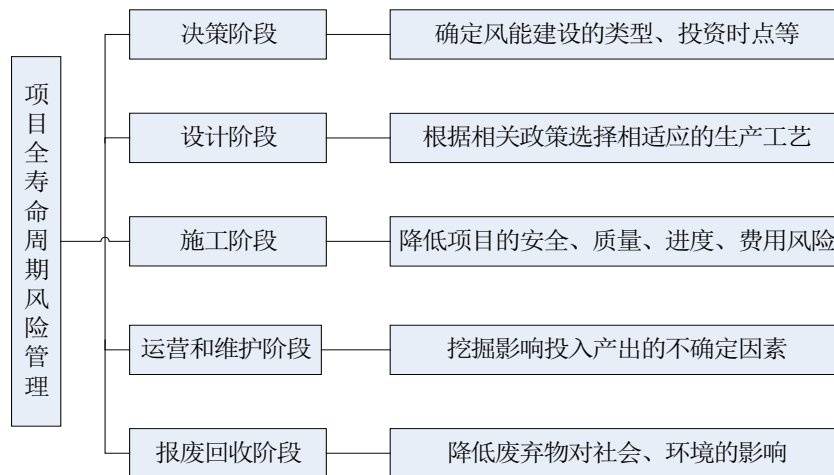


Figure 1. The process of whole life cycle risk management
图 1. 全寿命周期风险管理进程

电面对的政策法规以及发展态势，本文按风能发电项目决策阶段、设计阶段、施工阶段、运营和维护阶段以及报废回收阶段的全寿命周期对风险因素进行划分，确定风能发电项目在不同时期所面临的主要风险。

2.2.1. 决策阶段

1) 政策风险

当前条件下，对于风能发电来讲，电价较高，政策的支持对于风电未来的发展无疑起到至关重要的作用[4]。因此在风险项目决策阶段要对政策风险高度重视。

2) 气候不确定性风险

由于风力发电设备暴露在外，自然环境对发电能力及稳定性影响较大。北方地区主要问题是冰雪、洪水、地震等，沿海地区主要问题是雷击、台风、海啸等。低温状态下，叶片及风机设备可能被冻结或破坏。雷击是导致火灾的主要原因。因此，气候的不确定性风险对于风力发电影响也是很大的。

2.2.2. 设计阶段

1) 技术工艺环保风险

风电设备的设计和制造技术日渐成熟，但是随着风电机组大型化趋势明显，风轮直径、塔筒高度都明显增加，技术也要求更加复杂。同样中国政府对环境的重视程度日益提高，在开展工作的同时也要注意环境的保护[4]。

2) 地理位置选择风险

风力发电就是将空气流动的动能转变为电能，因此选择风资源丰富的地区建风电场对于设备的利用和效益的提高都有十分重要的作用。

2.2.3. 施工阶段

1) 融资风险

在未来，随着风电设备制造技术和风力发电技术的逐渐成熟，风电将逐步脱离国家补贴，从而风电上网电价也会随之降低，风电项目如何应对上网电价下降所带来的经营风险，是其在运行管理阶段面临的重要问题。

2) 工期拖延风险

在风电项目实施过程中，由于自然环境、社会环境、设计变更、设备缺陷、生产效率低等因素会对

风电工程进度产生负面的影响，会耽误项目进度也会造成不能按时投产发电。

3) 建设安全风险

风电项目实施阶段的安全风险，由自然环境因素、施工现场条件、人为因素、管理因素等引起。安全风险的一旦发生，严重的时候会导致暂停项目，直接后果就是风电建设工程延期以及建设成本增加。

4) 建设质量风险

因受征地范围广、建设成本高、政策依赖性强及开敞式、零散式施工等因素影响，使得风电场建设的不确定因素尤为复杂。严格把握风电场建设的质量等方面的风险控制，在风电项目管理过程中非常关键。

2.2.4. 运营维护阶段

1) 调度风险

随着能源与环境问题的日益突出，风力发电技术得到了越来越多的应用。风电机的大规模并网具有良好的效益，同时也给电力系统带来了很大压力，而调度直接影响设备的周转等问题，因此如何调度成为电力发电企业很重要的经济效益影响因素。

2) 效益不确定性风险

在风电项目实施过程中，由于资金融通、资金周转、利息、成本等不确定性，可能会影响项目的预期收益。随着风能发电项目规模的迅速扩大，风能发电项目的资金补贴日益呈现短缺现象，这也直接影响了风电项目的效益。

3) 上网电价风险

在未来，随着风电设备制造技术和风力发电技术的逐渐成熟，风电将逐步脱离国家补贴，从而风电上网电价也会随之降低，风电项目如何应对上网电价下降所带来的经营风险，是其在运行管理阶段面临的重要问题[4]。

4) 电网并网风险

在我国风能资源丰富地区常常地处偏远，电网建设落后。在风电场集中的“三北”地区，风电并网难题没有解决，风电场运行困难，被迫大量弃风。弃风现象严重影响了发电企业的经济效益，降低风电投资的热情，也造成了大量的能源浪费，致使风电行业的投资和环境效益低下。

2.2.5. 报废回收阶段

1) 使用寿命风险

风电设备工作的环境比较恶劣，位置也很偏远，设备运行时工作电压波动很大，设备的并网、解列频繁。而且低电压的故障也会对电力系统的稳定造成影响，这些因素都会直接影响设备的使用寿命，寿命的长短直接关系到风电项目的最终效益。

2) 报废处理风险

风能发电设备的结构破坏，不能进行修复或改装，需要对废弃的设备进行报废处理，报废处理既存在一些人员和资金的投入，处理的是否得当对于项目效益至关重要。

综上所述，在总结他人相关文献的基础上，本文依据我国风能发电投资风险的特点对项目投资风险进行了分析和整合。风能发电投资风险指标体系见图 2。

3. 基于解释结构模型的风电项目投资风险分析

3.1. 解释结构模型

3.1.1. 解释结构模型概述

1973 年，解释结构模型(Interpretative Structural Modeling, ISM)由美国的 J.华费尔教授提出，并应用

于分析复杂的社会经济系统。ISM 通过因素之间的关系分析将原本复杂无序的系统划分为若干个子系统，并借助有向边线将子系统之间、子系统内部元素之间的因果关系反映出来，从而形成一个径向关系明显、系统层次明确的系统结构网络。

3.1.2. 解释结构模型要素

1) 有向连接图

有向连接图是节点和有向边的集合，反映了在各要素之间存在的相互关系。如图 3 所示。

图 3 中，节点 1、节点 2、节点 3 表示系统中元素；其中，元素 1 与元素 2 之间的连线表示元素 1 直接影响元素 2；元素 2 与元素 3 之间的连线表示两者之间存在相互影响的关系。

2) 邻接矩阵

假设系统内共有 n 个元素，那么元素与元素两两之间就存在 $n \times n$ 个关系，而邻接矩阵(A)则表示有向连接图中各要素之间的连接状态，邻接矩阵为一 n 阶矩阵，矩阵元素 a_{ij} 表示元素 i 对元素 j 的直接影响关系[5]：

$$A = (a_{ij})_{n \times n}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{(元素 } i \text{ 对元素 } j \text{ 产生直接影响)} \\ 0 & \text{(元素 } i \text{ 对元素 } j \text{ 不产生直接影响)} \end{cases}$$

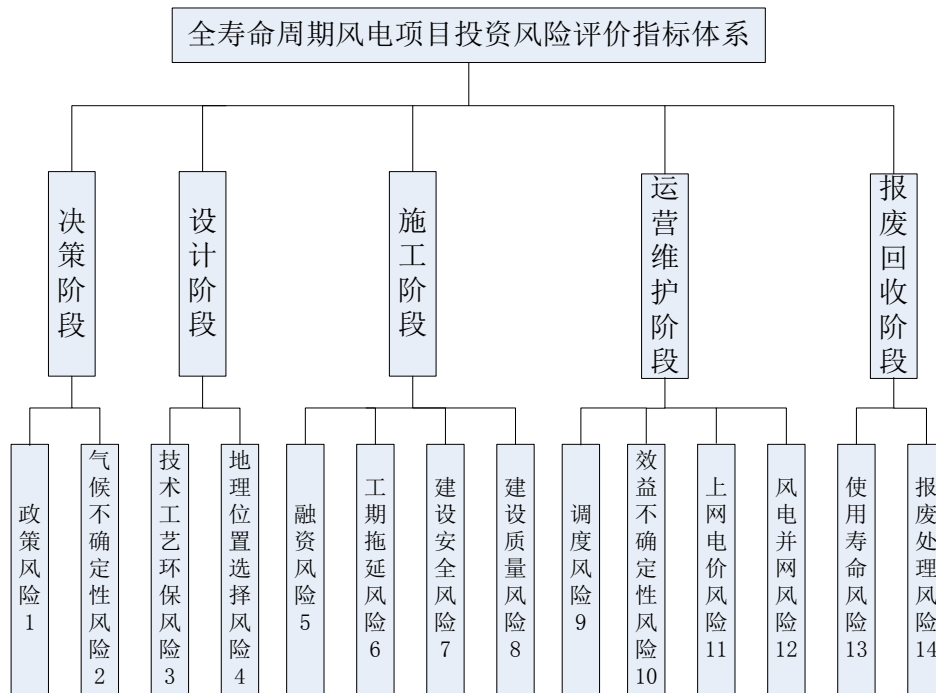


Figure 2. Wind power investment risk index system

图 2. 风能发电投资风险指标体系

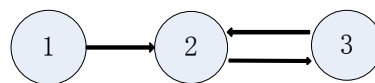


Figure 3. Directed graph based on the interpretation structure model

图 3. 解释结构模型有向连接图

3) 可达矩阵

元素与元素之间可能不存在直接的影响关系，通过影响关系的传递，因素之间可能存在间接的影响关系，而可达矩阵可以表示从一个要素到另一个要素是否存在因果传递的路径，反映了有向连接图各元素之间的可达程度[6]。

对于邻接矩阵 A ，满足：

$$(I + A)^m = I + A + A^2 + \dots + A^m \tag{1}$$

假设矩阵 M 在 m 为足够大的整数时满足：

$$M = (I + A)^{m-1} = (I + A)^m = (I + A)^{m+1} \tag{2}$$

则称矩阵 M 为邻接矩阵 A 的可达矩阵。特别地，如果可达矩阵的元素全为 1，则可达矩阵所表示的有向连接图为强连接图，系统中的所有元素之间均存在相互影响的关系。对于非强连接图，可达矩阵可以进行结构分解，继而找出可达矩阵内部的子强连接图。

3.2. 风能发电投资风险结构模型

3.2.1. 意识模型

以风能发电项目风险指标体系为基础，确定各元素之间的因果传递关系，由于指标名称太长就用数字来表示，如表 1 所示。

从风险指标间的影响关系可知，风能发电投资项目风险指标间的因果传递关系比较复杂，为了使风险指标间的关系更加清晰、更加直观，构建风险指标间的关系的邻接矩阵 A 。

指标	影响指标
1	3, 4, 5, 9, 10, 11
2	4, 9
3	5, 6, 9, 13
4	7, 9, 11, 12
5	6, 8, 10
6	5, 7, 8, 10, 12
7	6, 10
8	6, 7, 10, 13, 14
9	10
10	--
11	5, 10
12	10
13	10
14	10

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

在求得风能发电项目风险指标的邻接矩阵后，则可以根据式(1)、(2)求解风险指标的可达矩阵。可达矩阵计算的实质就是根据布尔代数运算法则求取邻接矩阵与单位矩阵和的多阶自乘矩阵的稳定形态。

通过 matlab 编程计算出可达矩阵 M 如下所示：

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.2.2. 结构模型

1) 区域划分

为进一步分析系统中各元素的传递关系，在求得可达矩阵后有必要对其进行区域划分，将系统划分为多个子系统。

对于系统中的元素 i ，将其影响的元素的集合定义为可达集 $R_{(i)}$ ；另外，将影响元素 i 的所有元素的集合定义为前因集 $T_{(i)}$ 。那么，如果元素 i 是矩阵 M 中最高级的元素，则可达集 $R_{(i)}$ 与前因集 $T_{(i)}$ 满足：

$$R_{(i)} = R_{(i)} \cap T_{(i)} \tag{3}$$

根据上式(3)，结构的最高一级要素就可以一一确定，将其从可达矩阵中划去相应的行和列。再从剩

下的可达矩阵中寻找新的高级要素，如次类推，可以找出相应矩阵中所包含的高级要素集合，从而实现可达矩阵的级间分。

以矩阵 M 为例，元素 10 的可达集与前因集满足：

$$R_{(10)} = R_{(10)} \cap T_{(10)}$$

因此，在整个系统中，元素 10 为最高级别的元素。将元素 10 所对应的行列删除并形成新的矩阵，继续在新的矩阵中寻找最高级别的元素，如此类推，矩阵 M 可以划分为 6 个层次，如图 4 所示。

如图 4 所示，风能项目发电投资风险指标体系的可达矩阵在划分后，各层级分别为：L1 = {效益不确定性风险 10}；L2 = {调度风险 9，风电并网风险 12，使用寿命风险 13，报废处理风险 14}；L3 = {融资风险 5，工期拖延风险 6，建设安全风险 7，建设质量风险 8}；L4 = {上网电价风险 11}；L5 = {技术工艺环保风险 3，地理位置选择风险 4}；L6 = {政策风险 1，气候不确定性风险 2}。

2) 阶层结构图

结合图 4 可以绘制出风能发电项目投资风险因素的阶层结构图以更直观的表达风险元素间的传递关系，如图 5 所示。

3.2.3. 结果分析

从上图 5 可以看出风能发电投资风险的属性各不相同，有些是终端风险，例如风险 10，各种不同风险的发生都将通过风险传递影响该风险因素，最终反映在效益不确定性风险上。有些是过程风险，例如风险 11。风险 1 和风险 2 属于源头风险通过直接影响技术工艺环保风险和地理位置选择风险来影响其他的能源投资风险。

从风险因素的层次分布来看，基本上风能发电项目寿命周期前期的风险因素均分布于阶层结构图中较低的层次，相反，寿命周期后期的元素则分布于阶层结构图中较高的层次。这充分说明了风能发电项目投资风险的传递性，前期的风险管理不到位将加剧后期风险发生的可能性。

i	10	14	13	12	9	8	7	6	5	11	4	3	2	1
10.	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
7	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
6	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
5	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
11	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1		0
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1

Figure 4. The reachability matrix after partition
图 4. 划分后的可达矩阵

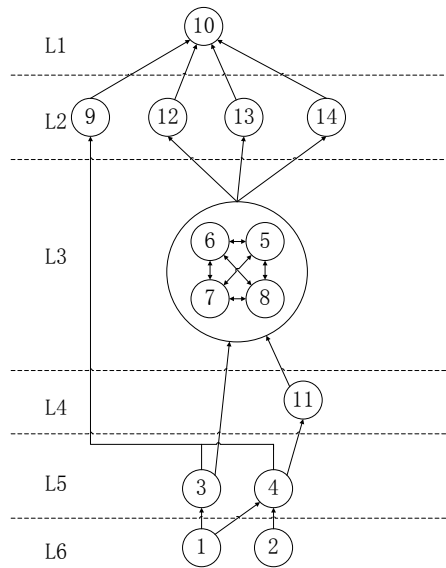


Figure 5. Wind power project investment risk factors of class structure
图 5. 风能项目投资风险因素的阶层结构图

4. 总结

在对风能发电风险进行管理时，应综合考虑风险因素之间的关系，对风险的控制从整体的角度来进行，从而尽可能取得更好的管理效果。

通过解释结构模型可以更加全面的分析风能发电投资的风险因素，为风能发电的风险管理提供决策支持。同时将全寿命周期理论引入到解释结构模型中，可以更好的辅助分析系统风险元素之间的相互关系，为解释结构模型的使用提供更好的理论基础。

参考文献 (References)

- [1] 李泽庆 (2010) 我国风电业投资分析. 天津大学, 天津.
- [2] 孙丽梅 (2010) 风能利用现状及前景分析. *内蒙古电力技术*, **6**, 9-11, 16.
- [3] 李江锋 (2013) 基于生命周期成本法的风力发电系统综合效益评价研究. 西安理工大学, 西安.
- [4] 李峰 (2012) 基于全寿命周期理论的风电项目投资风险评价模型. *华东电力报*, **TM-9**, F407.611001-952904-0531-05.
- [5] 侯文甜 (2012) 基于解释结构模型的发电企业营销风险分析与控制. 华北电力大学(北京), 北京.
- [6] 杨彬, 于渤, 孙倩等 (2010) 基于解释结构模型的海外油气开发项目风险产生机理研究. *哈尔滨工程大学报*, **9**, 1259-1264.