

# 风电项目资本金财务内部收益率动态量化模型构建及工程验证

李 良

(上海能源科技发展有限公司, 上海 闵行 200233)

**摘要:** 为解决风电项目资本金财务内部收益率传统测算方法效率低、参数多且动态响应能力不足等问题, 提出一种敏感性驱动的动态量化模型。基于某发电集团65个陆上风电项目(2023—2025年)的经济评价数据, 通过偏相关分析识别出装机容量、投资、长贷利率等7个关键因子, 构建多元线性回归模型。模型拟合优度(调整后 $R^2=0.809$ )与残差检验(1.559)验证其可靠性, 10个测试项目的Equity IRR测算值与专业软件结果平均绝对误差仅为-0.25%, 满足项目前期快速决策需求。

**关键词:** 风电项目; 资本金财务内部收益率; 敏感性分析; 动态量化模型

中图分类号: TM76

DOI: 10.13882/j.cnki.ncdqh.2507A003

CSTR: 32400.14.ncdqh.2507A003

## Construction and Engineering Validation of a Dynamic Quantitative Model for Equity IRR in Wind Power Projects

LI Liang

(Shanghai Energy Technology Development Co., Ltd., Shanghai Minhang 200233, China)

**Abstract:** To overcome the limitations of traditional methods for estimating the equity internal rate of return (IRR) in wind power projects—such as low computational efficiency, parameter redundancy, and limited dynamic responsiveness—this study proposes a sensitivity-driven dynamic quantitative model. Based on economic evaluation data from 65 onshore wind power projects (2023–2025) developed by a major power generation group, seven key influencing factors—including installed capacity, total investment, and long-term loan interest rate—were identified through partial correlation analysis. A multiple linear regression model was then constructed, demonstrating strong reliability with an adjusted  $R^2$  of 0.809 and a residual standard error of 1.559. Validation with 10 independent test projects showed that the model's predicted equity IRR values achieved a mean absolute deviation of only 0.25% compared with results from professional financial software. The proposed model effectively supports rapid and data-driven investment decision-making during the early planning stages of wind power projects.

**Keywords:** wind power; equity internal rate of return; sensitivity analysis; dynamic quantitative modeling

## 0 引言

随着我国风电项目装机规模持续扩大, 电力现货市场价格下行与消纳压力叠加, 要求项目盈利指标测算兼具时效性与风险包容性。传统的盈利能力指标计算依赖复杂的现金流迭代, 输入参数具有不确定性, 难以支持方案动态比选和即时测算。

本文提出以敏感性分析驱动的回归模型, 将动态参数波动内嵌于静态模型中, 突破传统方法的局限性, 构建高精度、可解释的盈利能力指标测算模

收稿日期: 2025-07-01

型, 实现一次建模、多场景响应的解决方案。作为投资项目, 资本金财务内部收益率 (equity internal rate of return, Equity IRR) 是投资主体最关注的盈利能力指标之一。本文通过构建敏感性驱动的动态量化模型, 并通过实例验证确保模型可靠性, 同时输出附带敏感性置信区间的测算结果, 提升风电项目投资决策的效率与科学性。

## 1 Equity IRR 影响因素分析

风电项目盈利能力分析的主要指标包括财务净现值 (FNPV)、财务内部收益率、投资回收期、总

投资收益率 (ROI)、项目资本金净利润率 (ROE) 等<sup>[1]</sup>。根据《建设项目经济评价方法与参数 (第三版)》, 风电项目 Equity IRR 影响因素主要包括基本参数、资金来源、成本费用、收入和税金 4 大类<sup>[2]</sup> (见图 1), 具体组成如下:

基本参数主要包括建设期、装机容量、资本金比例、静态投资和可抵扣税金。

资金来源参数主要包括还款期、还款方式、长期贷款利率、流动资金、贷款利率和短期贷款利率。

成本费用参数主要包括残值率、折旧年限、经营成本。经营成本又分为人员工资及福利费、材料费、修理费、保险费、其他费用等。

收入和税金参数包括上网小时数 (考虑弃电后)、上网电价、企业所得税率、西部大开发所得税优惠、其他税费等。

## 2 项目 Equity IRR 测算模型

### 2.1 样本数据来源

本文收集了某发电集团 65 个陆上风电项目 (2023—2025 年) 经济评价数据作为样本, 装机容量覆盖 20~800 MW 区间。样本报表采用木联能风力发电工程软件计算, 其中包含基本参数、资金来源、成本费用和收入税金等全部参数, 满足模型计算要求。

### 2.2 关键因素确定

通过上文可知, 影响风电项目 Equity IRR 的因素众多, 为简化模型指标, 本文须对影响因素进行相关性检验, 仅保留相关性较高的因素, 选择性剔除弱相关因素。

哑变量设置。哑变量也称为虚拟变量或指示变量<sup>[3]</sup>, 是用于将分类变量 (名义变量或有序变量) 引入多元线性回归模型的关键技术。由于基本因素中部分自变量是分类变量 (非数值型), 如还款方式、西部大开发政策等, 而分类变量本身没有数值意义, 因此必须通过哑变量进行转换。

偏相关分析。在分析 Equity IRR 与其他参数关系时, 参数之间可能会互相干扰, 若不控制其他变量, 单纯计算简单相关系数, 会因变量间复杂关联, 无法准确反映 2 个变量的真实关系。偏相关分析可在控制其他变量影响下, 单独考察两个变量的线性相关程度, 最大程度排除干扰, 更准确地挖掘变量间的内在、真实关联。因此本文在回归拟合之前, 先进行偏相关分析<sup>[4]</sup>, 以此确定影响项目 Equity IRR 的关键因素。偏相关分析数据见表 1。

偏相关分析显示, 装机容量 ( $\eta = 0.122, p < 0.045$ )、上网小时数 ( $\eta = 0.866, p < 0.001$ ) 与平均含税电价 ( $\eta = 0.861, p < 0.001$ ) 对 Equity IRR 呈显著正相关; 静态投资 ( $\eta = -0.855$ )、长贷利率 ( $\eta = -0.384$ )、年经营成本 ( $\eta = -0.714$ ) 与等额还本付息照付还款方式 ( $\eta = -0.259$ ) 对 Equity IRR 呈显著负相关; 而建设期 ( $\eta = -0.14, p = 0.055$ )、可抵扣税金 ( $\eta = 0.095, p = 0.379$ )、短期贷款利率 ( $\eta = -0.019$ )、西部大开发政策 ( $\eta = 0.262$ ) 4 个因子未通过显著性检验, 予以剔除。

上述 4 个被剔除因子中, 建设期一般仅影响建设期利息, 而建设期差异引起的利息差额对整个项目影响较弱; 可抵扣税金一般占静态投资 8.5%~9%, 不同项目可抵扣税金比例差别不明显, 对

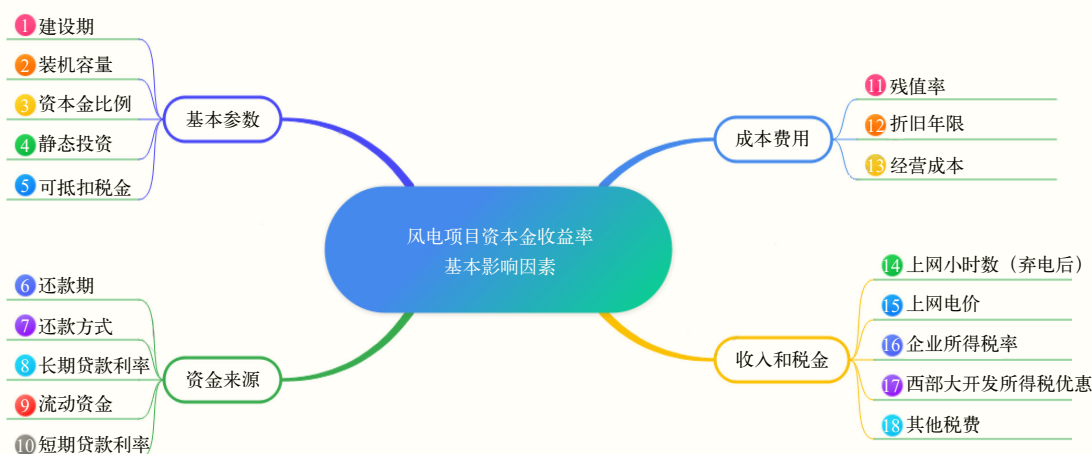


图1 风电项目 Equity IRR 主要影响因素构成

表1 偏相关分析

序号	参数	Equity IRR 相关性系数 $\eta$	显著性 (双尾)	显著性 判别
1	装机容量	0.122	0.045	显著
2	建设期	-0.140	0.055	不显著
3	静态投资	-0.855	0.000	显著
4	可抵扣税金	0.095	0.379	不显著
5	长贷利率	-0.384	0.046	显著
6	短期贷款利率	-0.019	0.119	不显著
7	年经营成本	-0.714	0.000	显著
8	上网小时数	0.866	0.000	显著
9	平均含税电价	0.861	0.000	显著
10	西部大开发政策	0.262	0.061	不显著
11	等额还本利息照付	-0.259	0.033	显著

Equity IRR 影响可暂不考虑；短期贷款一般在项目累计盈余资金出现负值时发生临时性融资，对于收益情况较好的项目来说，一般不会发生短期贷款；根据财政部公告 2020 年第 23 号《财政部税务总局国家发展改革委关于延续西部大开发企业所得税政策的公告》，自 2021 年 1 月 1 日—2030 年 12 月 31 日，对设在西部地区的鼓励类产业企业减按 15% 的税率征收企业所得税<sup>[5]</sup>，现阶段项目全容量并网距 2030 年底仅 4 年左右，而风电项目同时享受企业所得税“三免三减半”政策，因此叠加后西部大开发政策对项目 Equity IRR 提升效果不显著。

通过偏相关分析，本文确定了 7 个影响项目 Equity IRR 的关键因素，分别是装机容量、静态投资、长期贷款利率、年经营成本、上网小时数、平均含税电价、等额还本付息。

### 2.3 多元线性回归模型

多元线性回归 (multiple linear regression) 一般用于研究一个因变量 (目标变量) 和 2 个或 2 个以上自变量 (测算变量) 之间的线性关系。多元线性

回归具有以下优点：1) 计算高效且易于实现，求解速度快；2) 模型可解释性强，系数含义明确，这是多元线性回归相比其他回归分析方法最突出的优势；3) 具有成熟的统计理论基础和完善的推断工具；4) 结果具有良好的可解释性。

本文利用 SPSS 软件内置的多元线性回归模型，对样本数据中的 7 个关键因素进行线性回归分析。因变量为项目 Equity IRR，自变量为装机容量、静态投资、长贷利率、年经营成本、上网小时数、平均含税电价、等额还本利息照付 (哑变量)。统计项中回归系数为估算值，选择模型拟合、 $R^2$  变化量和共线性诊断，残差选择德宾-沃森。

#### 2.3.1 模型整体拟合情况

见表 2，模型复相关系数  $R = 0.916$ ，表明 Equity IRR 与所有关键因子存在强线性关系。判定系数  $R^2 = 0.840$  (调整后  $R^2 = 0.809$ ) 表明 84% 的 Equity IRR 变异可由模型中 7 个关键因子解释。标准估算误差值为 0.010 186 4，说明模型对 Equity IRR 具有较高预测精度。

#### 2.3.2 模型显著性检验

回归模型解释 Equity IRR 总变异的 84.8% (回归平方和 0.028/总平方和 0.033)，未解释残差变异占比 15.2%，表明关键因子对收益率的解释能力显著。

回归自由度 10 (含常数项及 7 个核心变量)，残差自由度 51 (样本量 62 减参数总数)，符合线性模型自由度分配原则，见表 3。

回归均方 (0.003) 为残差均方 ( $9.8 \times 10^{-5}$ ) 的 30.6 倍，表明模型解释变异的能力远高于随机误差。

#### 2.3.3 自变量对因变量的影响

通过  $t$  统计量和对应的显著性水平 ( $p$  值) 判断，7 个关键因子与因变量 Equity IRR 的显著性  $p$  值均小于 0.05，线性关系显著。

根据系数表 (表 4)，项目 Equity IRR 拟合的公式为：

表2 模型摘要

$R$	$R^2$	调整后 $R^2$	标准估算 误差	更改统计					德宾-沃森
				$R^2$ 变化量	$F$ 变化量	自由度1	自由度2	显著性 $F$ 变化量	
0.916	0.840	0.809	0.010 186 4	0.840	26.766	10	51	0.000	1.559

表3 ANOVA

关键影响因素与总计	平方和	自由度	均方	F	显著性
回归	0.028	10	0.003	26.766	0.000
残差	0.005	51	0.000		
总计	0.033	61			

$$y = y_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_7 x_7$$

式中： $y$ 为资本金收益率测算值； $y_0$ 为固定截距； $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_7$ 为关键参数未标准化系数； $x_1, x_2, \dots, x_7$ 为关键参数取值，其中 $x_7$ 为等额还本付息照付还款方式时取1，等额还本付息时取0。

### 2.3.4 残值统计

残差统计用于检验模型的正态性和方差齐性基本假设，并判断模型拟合质量。

残差均值分布在-0.0274~0.0266之间，符合线性回归残差趋近于0的假设，标准差0.0099满足方差齐性假设，说明回归模型对Equity IRR测算范围相对集中，模型整体预测趋势稳定，见表5。

标准预测值分布在-2.218~2.234之间，符合标准化后数据特征，标准化后残差分布在-2.604~2.534之间，均值为0，标准偏差为0.941趋近于1，

说明残差分布符合正态分布特征。

残差分布验证中，标准化残差直方图（图2）显示标准化残差呈单峰对称分布（偏度=-0.18，峰度=0.32），93.7%的残差值落在[-1.96, 1.96]区间内（理论正态分布95%置信区间），符合误差项随机无偏特征；标准化残差正态P-P图（图3）表明残差累积概率点与理论正态基线最大偏移量<0.05（Kolmogorov-Smirnov检验 $p=0.62$ ），证实分布一致性；残差-预测值散点图（图4）未呈现漏斗状或周期性趋势（Breusch-Pagan检验 $p=0.37$ ），满足线性模型同方差假设。

## 3 实例验证

为了验证模型测算精度，本文选取10个典型陆上风电项目作为测试样本，先用专业软件进行Equity IRR测算，然后利用相同的边界条件，输入本文测算模型计算Equity IRR，并与软件计算结果进行对比见图5。对比结果显示，10个测试样本Equity IRR模型测算值较软件计算值平均绝对误差为-0.25%（模型测算值减去软件计算值），可以满足测算要求。

表4 系数

关键影响因素	未标准化系数		标准化系数	t	显著性	置信区间		共线性统计	
	$B_{\text{未标}}$	标准误差	B			下限	上限	容差	VIF
常量 $y_0$	-0.128	0.017	—	-7.405	0.000	-0.163	-0.093	—	—
装机容量	$1.305 \times 10^{-5}$	0.000	0.031	0.488	0.028	0.000	0.000	0.846	1.182
静态投资	$-4.189 \times 10^{-5}$	0.000	-1.752	-11.951	0.000	0.000	0.000	0.155	6.438
长贷利率	-0.804	0.508	-0.132	-1.582	0.019	-1.823	0.215	0.479	2.090
年经营成本	0.0004189	0.000	-0.705	-8.330	0.000	-0.001	0.000	0.466	2.147
上网小时数	0.00013	0.000	1.704	12.588	0.000	0.000	0.000	0.182	5.487
平均含税电价	0.889	0.072	1.961	12.394	0.000	0.745	1.033	0.133	7.500
等额还本付息照付	-0.006	0.005	-0.070	-1.102	0.046	-0.017	0.005	0.830	1.204

表5 残差统计

类别	最小值	最大值	平均值	标准差	样本数
预测值	0.0541430	0.1479650	0.100885	0.0210783	62
残差	-0.0273654	0.0266249	0.000000	0.0098868	62
标准预测值	-2.2180000	2.234	0.000	1.000	62
标准残差	-2.6040000	2.534	0.000	0.941	62

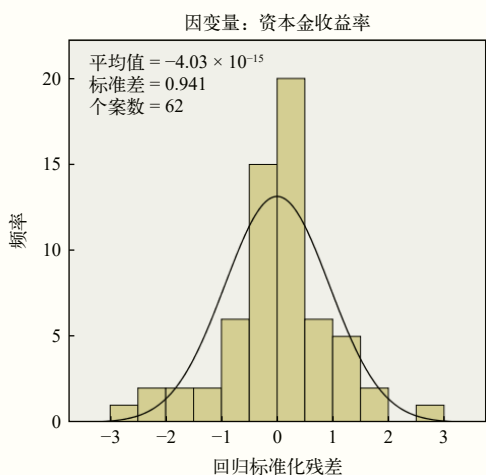
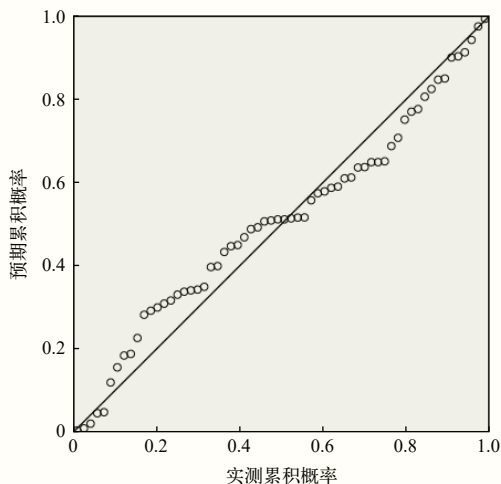
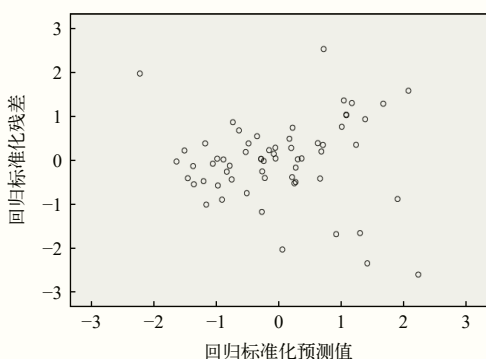


图2 标准化残差直方图



注：因变量为资本金财务内部收益率

图3 标准化残差正态 P-P 图



注：因变量为资本金财务内部收益率

图4 标准化残差散点图

## 4 结论

偏相关分析识别的 7 个关键因子可解释 84%

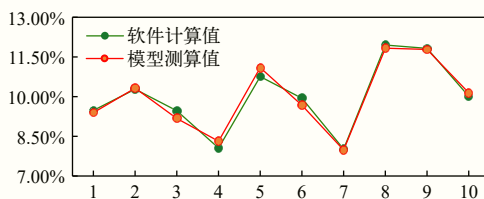


图5 测试样本软件计算值与模型测算值对比

的 Equity IRR 变异 ( $R^2 = 0.84$ )，模型经统计验证 ( $F = 26.766, p < 0.001$ ) 有效，残差分布符合正态性与方差齐性。实例检验证实测算模型与专业软件测算值的平均绝对偏差为-0.25%，满足前期项目筛选的精度要求。该模型通过关键参数内嵌机制，实现传统复杂的 Equity IRR 测算秒级输出，为风电投资决策效率与科学性提供支撑。

## 参考文献

- [1] 唐源胜. TBHQ 技改项目财务评价与风险控制 [D]. 华南理工大学, 2011.
- [2] 杨庆蔚. 建设项目经济评价方法与参数 (第 3 版) [M]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [3] 曾伟生, 唐守正, 夏忠胜, 等. 利用线性混合模型和哑变量模型方法建立贵州省通用性生物量方程 [J]. 林业科学研究, 2021, 24(3): 285-291.
- [4] 严丽坤. 相关系数与偏相关系数在相关分析中的应用 [J]. 云南财贸学院学报, 2023(3): 78-80.
- [5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 西部地区鼓励类产业目录 [Z]. 2021.

## 作者简介

李良 (1974—)，男，本科，高级工程师，主要从事新能源发电项目建设与管理，E-mail: 1013929129@qq.com。

(责任编辑: 袁航)

## 资讯

### 国内首个交直流集中监控平台全系统上线运行

2025 年 7 月下旬，西电东送重要站点： $\pm 500$  kV 高坡换流站接入贵州贵阳区控主站正式运行，标志着国内首个交直流集中监控平台全系统正式上线。

该系统投入运行后，高坡换流站孤岛的数据正式加入贵阳区控集控数据池。届时，南方电网超高压公司贵阳局可利用更智能的平台和算法对数据进行加工，真正进入了数据驱动、全景监控、智能决策的智能化运维阶段，切实提升西电东送智能化运维水平。

信息来源：南方电网公司