

低风速风电机组多学科优化设计

王 璇, 巫发明, 王 磊, 李慧新

(南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 探讨了风资源特性及风电机组的空气动力学特性、结构动力特性、结构、控制和功率特性等在整机设计过程中的关系, 构建了以风电机组度电成本和综合成本率为目标函数的低风速风电机组的多学科优化设计模型。通过探寻低风速风电机组各参数之间的最佳组合, 寻求满足系统各项性能要求的最优解。在风电机组设计阶段, 通过开展多学科优化设计分析, 能够有效地提高产品综合性能、缩短研发周期、提高产品的竞争力。

关键词: 风电机组; 低风速; 载荷; 多学科优化设计

中图分类号: TM315; TM30

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2013)03-0016-05

Multidisciplinary Design Optimization of Low Wind Speed Wind Turbine

WANG Dian, WU Fa-ming, WANG Lei, LI Hui-xin

(CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: It discusses the relationship between characteristics of wind resource and aerodynamics, structural dynamics, structure, control performance, power performance of wind turbine. Model of multidisciplinary design optimization for low wind speed wind turbine is presented with the cost of electricity(COE) and combined ratio as the objective function. To meet the performance requirements of the optimal solution, it searches the best combination of parameters of low wind speed wind turbines. Multidisciplinary design optimization during product concept design stage can improve the comprehensive performance, shorten the development cycle and enhance competitiveness of wind power products.

Key words: wind turbine; low wind speed; load; multidisciplinary design optimization

0 引言

随着我国风电装机数量的不断增加, 低风速风电场(IEC III类以下)引起业内越来越大的关注。据相关统计, 我国低风速地区面积占全国总面积的68%^[1]。低风速风电场的风力资源相对匮乏, 如何保持在该类地区投资成本及其收益的有效平衡是一个非常关键的问题。

风电机组的设计面临多学科问题, 需综合考虑风电场特性及风电机组的结构、材料、空气动力、电磁、载荷和控制等多个学科之间的耦合关系; 其中的部件之

一叶片的设计也存在多学科问题, 国内已有研究人员针对叶片采用学科理念进行优化设计^[2]。以往, 复杂的多学科设计是通过各个学科有限次地迭代设计、计算和试验得到可行解, 并得到最终设计结果, 但往往不是最优设计结果。多学科设计优化是寻求总体系统优化与子系统级优化最佳协同效果, 同时考虑不确定性对设计过程和设计结果的影响, 因此现代的多学科设计优化提供了设计流程的集成、分析流程的自动执行等技术, 可将多个学科的分析集成到同一个环境中, 以便充分考虑多个学科间的耦合和相互影响, 最终获取整体系统的最优解^[3]。

国内针对低风速风电机组的开发大多集中在增加风轮直径方面, 少有研究者从整机层面对低风速风电

收稿日期: 2013-04-10

作者简介: 王璇(1979-), 男, 博士, 主要研究方向为风力发电机组整机系统设计。

机组进行优化设计。加长叶片尽管会增加机组成本,但可大幅提升机组的年发电量,从而降低机组的度电成本^[4]。文献[5]和[6]对低风速风电场的叶片设计进行研究,表明通过合理的设计能够有效地提高风电机组在低风速风电场的气动效率。本文利用多学科设计优化集成平台技术,综合考虑风电机组各子系统的相关耦合关系,从整机设计角度出发,以2 MW低风速风电机组为实例进行整机优化设计分析并给出计算结果。

1 风电机组发电量的估算

风电机组的年发电量与机组功率曲线和风电场风能资源特性相关^[7],是多学科设计中需优化的一个关键目标,其理论计算公式如下(设一年的小时数为8 760):

$$P_{AE} = \int_{V_{in}}^{V_{out}} P(v) \times P(v) dv \times 8760 \quad (1)$$

式中: P_{AE} ——风电机组的理论年发电量; V_{in} ——风电机组切入风速; V_{out} ——切出风速; v ——风速; $P(v)$ ——风电机组的输出功率; $p(v)$ ——风速的分布概率。

风电机组的输出功率与其所选择的叶片长度、气动性能、整机控制策略及机组效率相关,其理论计算公式如下:

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho S C_p \eta v^3 = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 C_p \eta v^3 \quad (2)$$

式中: C_p ——风能利用系数; η ——风力发电机组总效率(包括传动系统效率、发电机效率及变流器效率等); ρ ——空气密度; S ——风轮的扫风面积; r ——风轮半径。

风速的分布概率可以用Weibull分布的概率密度函数来描述,通常情况下可取Rayleigh分布。文献[8]给出了风速概率分布的详细计算方法。风速随高度的变化规律可以用幂定律拟合:

$$v_2 = v_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (3)$$

式中: α ——风切变指数; v_1 —— h_1 高度的风速; v_2 —— h_2 高度的风速。

利用式(1)~式(3)即可计算得到风电机组在不同年平均风速下的年发电量。文中风电机组年发电量的计算采用GH Bladed软件^[9]。

对于实际运行的风电机组来说,其发电量的估算还需考虑湍流、叶片污染、偏航误差、尾流效应、自用电、可利用率及气候停机等因素的影响,因此在对风电机组的实际发电量进行预估时,通常会在理论发电量的基础上取一个折减系数。目前,国内风电场可行性研究报告中所取的折减系数一般在0.7左右。

2 风电机组成本的估算

成本是风电机组多学科设计中需优化的另外一个关键目标,其构成复杂,与风轮直径、功率等级、风电机组的型式及轮毂高度等众多因素相关。本文以双馈型机组为例,并参考文献[10]中相关经验公式,分别对风轮、机舱、塔架和基础以及其他部件进行成本估算。

风轮系统主要包括3大部件:叶片、变桨系统和轮毂。式(4)示出风轮成本的经验计算公式,可以看出,风轮成本与叶片长度直接相关。

$$Cost(\text{rotor}) = (2.49 \times R^3 - 1.3E5) \times BCE + 2.7 \times R^{2.5} \times GDPE \times \frac{GDPE}{1-0.28} + (25.7M + 1.5E5) + 2.98 \times (2R)^{2.65783} \quad (4)$$

式中: R ——风轮直径; BCE ——叶片材料成本系数; $GDPE$ ——叶片制造成本系数; M ——单个叶片质量。

机舱主要包括主轴、主轴承、齿轮箱、发电机、变流器、主机架、偏航系统和机舱罩。其结构部件的成本和尺寸主要与风电机组所承受的载荷相关,风轮重量及叶片长度的增加将会导致这些部件成本的增加。对于发电机和变流器而言,其成本主要取决于风电机组的功率等级。机舱成本估算经验公式如式(5)所示,可以看出,其最关键的影响因素为叶片长度和风电机组的功率等级。

$$Cost(\text{Nacella}) = 0.62 \times (2R)^{2.887} + 2 \times \left(R \times \frac{2}{75} - 0.033 \right) \times (2R)^{2.5} + 0.42 \times (2R)^{2.964} + 73.89 \times (2R)^{1.953} + 102 \times P^{1.249} + 964.3 \times P + 2.39E4 \quad (5)$$

式中: P ——风电机组的功率等级。

塔筒的高度是风电机组设计时需考虑的一个重要参数,选择时不仅要满足“风轮旋转时叶片尖部要离地面一定的高度”的要求,也要考虑经济性和发电量的关系。式(6)示出塔架及其基础的成本经验公式,可以看出,对塔架及其基础而言,最重要的影响因素是叶片长度和塔架高度。

$$Cost(\text{tower}) = 3.69 \pi R^2 H + 1.88E3 (\pi R^2 H)^{0.4037} - 1.315E4 \quad (6)$$

式中: H ——塔架高度。

此外,计算风电机组的成本时,还需考虑机组的安装成本 $Cost(\text{install})$ 及运维成本 $Cost(\text{maintance})$, 相关经验公式如下所示:

$$\left. \begin{aligned} Cost(\text{install}) &= 12.18 \times (2RH)^{1.1736} + P \times (93.07 \times 10^{-6} P^2 - 0.1745P + 873.2) + 2.17E5 \\ Cost(\text{maintance}) &= 66.34P + 0.0434P_{AE} \end{aligned} \right\} (7)$$

机组成本的预估模型非常复杂,不仅与机组的型

式(双馈、直驱或者其他型式)、风轮直径及功率等级相关,而且与制造商、部件供应商乃至运营商的状况相关联,因此很难非常精确地进行评估。本文应用风电机组多学科优化设计集成平台成本模型对目前行业内成熟的机型进行了验证。结果显示,该模型相对准确,具备一定的合理性,因此后续分析中采用该模型进行成本预估。

3 优化目标及约束条件

3.1 优化目标

对低风速风电机组进行整机优化设计时,需综合考虑机组整体性能和各部件之间的相互耦合关系,以寻求最优目标。针对低风速风电场,要提高机组的发电量,一种方法是增加风轮直径,但同时会加大机组的受力,使得风轮、机舱、塔筒和基础的尺寸、重量及成本增加;另一种方法是提高轮毂的高度,但亦会增加塔架和基础的建造成本。不仅如此,风电机组部件尺寸和重量的增大还会增加机组后期的运维成本。可以看出,风轮直径、风电机组的功率等级、轮毂高度对风电机组的发电量(P_{AE})和总成本有直接的关系,而后二者决定了风电机组的度电成本(COE),其计算公式如式(8)所示^[10]。

$$COE = \frac{I \times A \times AOE}{P_{AE}} \quad (8)$$

式中: COE ——度电成本; I ——项目初始投资; A ——等额资金回收系数(与银行利率相关); AOE ——运行维护费用; P_{AE} ——机组的发电量。

COE 是衡量机组综合性能最关键的指标,其大小决定了单位投资的收益;另一个重要目标即对应风电机组的发电量(P_{AE}),它决定了总收益。为了综合考虑“总发电量大”和“度电成本低”这2个目标,本文引入了风电机组开发综合成本率(Y)的概念:

$$Y = F_1(COE) + F_2(P_{AE}) \quad (9)$$

式中: F_1 ——度电成本率; F_2 ——发电量成本率。

在优化设计中,将分别调整风轮直径和轮毂高度,以追求 Y 值最低为总设计优化目标。需要说明的是,本文主要是对机组性能和成本的变化趋势开展研究,为了消除数据不可公度性,后续结果中对度电成本和综合成本收益率进行了无量纲处理(单位化处理)。

3.2 约束条件

低风速风电机组的优化设计是基于已有的常规风电机组而开展的,从整机设计经验考虑,增加了以下3方面的约束:

(1) 风轮推力

在机组工作时,风轮推力的增加直接影响着风轮和塔架的寿命及其成本。因此,在建立优化模型时,对风轮的推力 F 进行了约束,即 $F \leq F_{\max}$ (F_{\max} 为最大推力,由常规风电机组的载荷决定)。

(2) 风轮转矩

风轮的转矩决定了风电机组的输出功率,转矩越大,输出功率就会越大;但过大的转矩会增加风电机组传动系统的载荷,进而降低齿轮箱的寿命。因此本文对风轮的转矩 M 进行了约束,即 $M \leq M_{\max}$ (M_{\max} 为常规风电机组的最大转矩)^[9]。

(3) 机组的年满发小时数

为了保证机组的总体发电量,对机组的年满发小时数最低值进行了约束。

4 2 MW 低风速风电机组优化设计结果分析

4.1 风轮直径的影响

对于低风速风电场,通过适当加长风轮直径,可以提升发电量、降低度电成本,获得较优的综合成本率;但如果一味追求发电量而过度加长风轮直径,将有可能提高风电机组的度电成本,因此选择风轮直径时需要综合考虑发电量和度电成本的影响。

图1~图3分别示出不同的年平均风速下年发电量、度电成本和综合成本率随风轮直径变化的趋势,其计算条件为:轮毂高度80 m,风剪切系数0.2,年平均风速分别为5.5 m/s,6.5 m/s,7.5 m/s,风轮直径在80~120 m范围内。可以看出,发电量随风轮直径的增加而增加,但度电成本和综合成本率并不是一个单调变化的过程,可以从图中找到对应的最低点,也就是所追求的设计最优目标。从计算结果来看,年平均风速7.5 m/s,6.5 m/s,5.5 m/s对应的最优风轮直径范围分别为95~100 m,105~110 m,115~120 m。

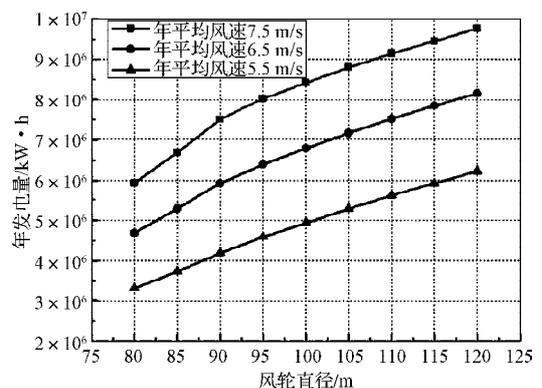


图1 年发电量与风轮直径的关系

Fig. 1 Relationship between annual power yield and diameter of wind wheel

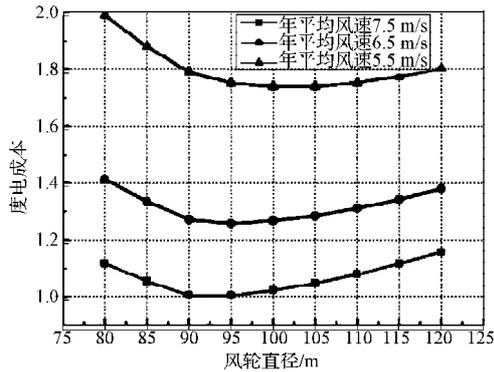


图2 度电成本与风轮直径的关系

Fig. 2 Relationship between COE and diameter of wind wheel

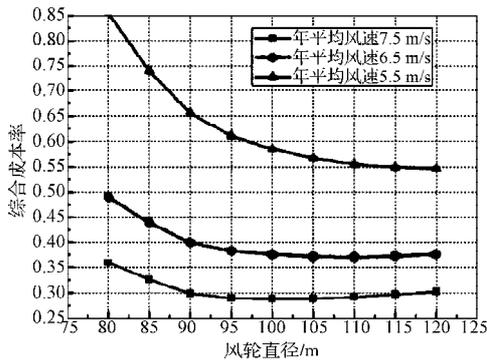


图3 综合成本率与风轮直径的关系

Fig. 3 Relationship between general cost benefit ratio and diameter of wind wheel

4.2 塔筒高度的影响

图4~图6分别示出在不同风剪切下的年发电量、度电成本及综合成本率随塔筒高度变化的趋势,其计算条件为风轮直径93 m、年平均风速6.5 m/s、风剪切系数(0.2, 0.15, 0.1)、塔筒高度范围70~110 m。可以看出,由于存在风剪切,随着塔筒高度的增加,整机的发电量呈上升的趋势。该趋势受风剪切系数影响,风剪切系数越大,塔筒高度增加所带来的发电量增加的收益越高。在本文所计算的塔筒高度范围内,塔筒高度每增加1 m,风剪切系数为0.2, 0.15和0.1时所对应的年发电量约增加0.43%, 0.32%和0.21%。对成本而言,塔筒高度每增加1 m,其整机成本约增加0.28%。

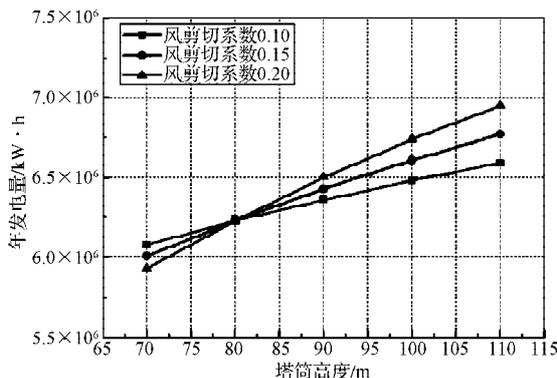


图4 年发电量与塔筒高度的关系

Fig. 4 Relationship between annual power yield and tower height

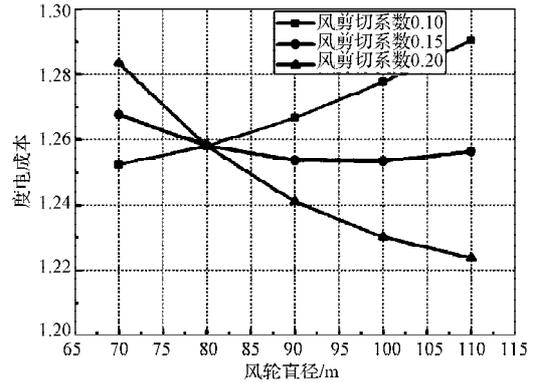


图5 度电成本与塔筒高度的关系

Fig. 5 Relationship between COE(unitized) and tower height

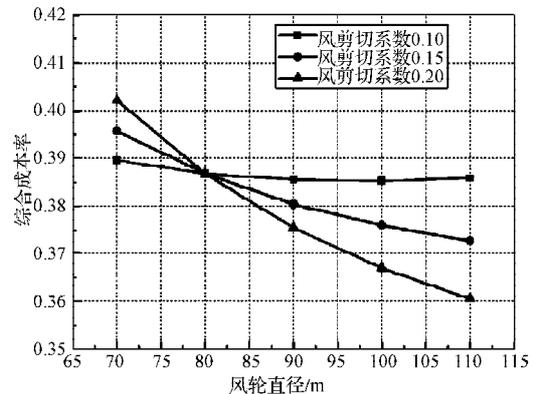


图6 综合成本率与塔筒高度的关系

Fig. 6 Relationship between general cost benefit ratio and tower height

综上所述可以看出,机组的度电成本和综合成本率的变化并非呈单调趋势。在本文所计算的塔筒高度范围内,当风剪切较小时,塔筒增高所带来的发电量增加的收益较低,导致度电成本呈上升趋势。反之,当风剪切较大时,塔筒增高会导致度电成本呈下降趋势。此外,塔筒高度的优化设计受风资源的特性影响比较大,因此风电机组设计时需要充分考虑其影响。

4.3 整机优化算例分析

利用已构建的风电机组多学科优化设计平台,以2 MW低风速风电机组设计为例,综合考虑风电机组各子系统的相关耦合关系,分别以风电机组的度电成本和综合成本率为目标,使用遗传算法进行搜索寻优设计^[11]。表1示出所设计的风电机组输入参数。

表1 风电机组输入参数

Tab. 1 Input data of wind turbine

功率 / MW	空气密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	年平均风速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	湍流强度	风速分布	风剪切系数
2.0	1.225	5.5~6.5	A	Rayleigh (瑞丽分布)	0.1~0.15

本文对4种工况进行了计算,其所对应的年平均风速、风剪切及可利用小时数的约束如表2所示。

表2 优化输入条件及约束

Tab. 2 Optimizing input conditions and constraints

	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
风速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	5.5	5.5	6.5	6.5
风剪切系数	0.15	0.1	0.15	0.1
利用时间 /h	>2 000	>2 000	>2 000	>2 000

通过遗传算法的迭代,其种群目标函数均值的变化与最优解的变化如图7所示。

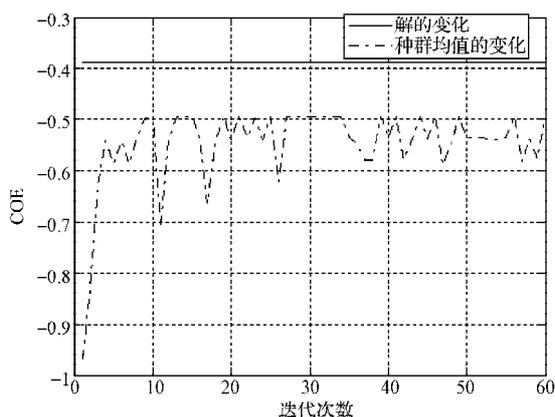


图7 种群目标函数均值的变化与最优解的变化

Fig. 7 Variation of mean population objective function and its optimal solution via iteration steps

表3示出了以综合成本率最低为目标、4种工况下风轮直径和塔筒高度的最优设计结果,其中发电量 1 为该结果计算下的单机年发电量,最优度电成本为以度电成本为目标、优化计算得到的最优度电成本,发电量 2 为最优度电成本目标下计算得到的单机年发电量,度电成本数据为单位化数据。

表3 以综合成本率为优化目标的结果

Tab. 3 Results of the optimizing design for general cost benefit ratio

	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
综合成本率	0.534	0.547	0.366	0.372
风轮直径 /m	117.5	121	104	111.7
塔筒高度 /m	100	85	100	85
发电量 $1/\text{kW} \cdot \text{h}$	4.52E6	4.47E6	5.26E6	5.38E6
度电成本	1.792	1.821	1.291	1.326
最优度电成本	1.722	1.762	1.256	1.262
发电量 $2/\text{kW} \cdot \text{h}$	4.08E6	4.01E6	4.54E6	4.37E6

从优化结果来看,年平均风速对风轮直径的选择影响较大,年平均风速越低,其度电成本也越高。当设计风电场年平均风速在 6.5 m/s 左右时,选用 $105 \sim 110 \text{ m}$ 的风轮直径具有综合优势;当设计年平均风速在 5.5 m/s 时,需要进一步加大叶片的长度才能保证风电机组的竞争优势。风剪切系数对塔筒高度的选择影响较大,风剪切系数越低,越适合采用较低的塔筒高度。

需要说明的是,以上的优化设计结果是基于理论计算值。在风电机组实际设计时,还需要考虑部件供应

商所能提供的产品状况,比如风轮直径,需要根据实际的叶片长度进行后续设计。

5 结语

当风电机组的设计环境条件确定后,首先需要考虑风电机组的风轮直径和塔筒高度这两个参数,其在很大程度上决定了风电机组的性能和成本。本文借用多学科设计方法,综合考虑年发电量、度电成本和综合成本率,耦合了各学科在优化模型中的关系,采用遗传算法进行搜索寻优,并给出了对应条件下 2 MW 低风速风电机组整机优化算例。研究表明:

(1)随着年平均风速的降低,最优风轮直径增大,度电成本也呈上升趋势。

(2)当风剪切系数较大时,通过增加塔筒高度来提高轮毂处年平均风速,可以获取更多的能量来保证度电成本较低的目的;当风剪切系数较小,由于发电量增加的收益减小,综合考虑各因素,更适于采用较低的塔筒。

(3)在整机设计过程中,风电机组发电量及成本受风资源的特性影响比较大,需在优化设计过程将风资源特性作为相应的输入条件和约束条件。

本文所提出的综合成本收益率,是综合考虑了机组的度电成本和总发电量的一个目标(分别对应单位投资的收益和总收益)。在风电机组实际设计时,需要根据风电场投资商的实际需求进行定义,本文仅给出了一种优化设计方法。

参考文献:

- [1] 申新贺,叶杭冶. 低风速地区风电开发成本探讨[J]. 风能技术, 2011(10): 32-34.
- [2] 吴江海,王同光,赵新华. 风力机叶片优化设计目标[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(5): 661-666.
- [3] 刘伟江,潘柏松,陈栋栋. 大型风力机叶片的耦合优化方法[J]. 机电工程, 2012, 29(3): 261-264.
- [4] 杨壮凌. 轮毂尺寸调整对风力机气动性能影响的研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(10): 1362-1365.
- [5] 岳珠峰. 航空发动机涡轮叶片多学科设计优化[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [6] 柴建云,张舒扬. 低风速风力发电机组造价与度电成本分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2011, 51(3): 356-359.
- [7] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [8] Burton T, Sharpe D, Jenkins N. Wind Energy Handbook[M]. USA: John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [9] Bossanyi E A. GH Bladed theory manual [M]. England: Garred Hassan and Partners Limited, 2007: 1-110
- [10] Fingersh L, Hand M. Wind turbine design cost and scaling model [R]. USA: NREL, TP-500-40566, 2006.
- [11] 雷英杰,张善文,李续武,等. MATLAB遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.