

火力安全发电 关键设备故障诊断

李 宁 侯媛彬 赵建文 著

1.3



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

火力安全发电关键设备 故障诊断

李 宁 侯媛彬 赵建文 著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书的主要内容是基于机器学习的理论和方法研究其在火电厂故障诊断中的应用,在全面综述国内外相关火电厂发展现状的基础上,重点介绍了作者在这一领域的研究成果,包括基于模糊多级支持向量机的运输机的故障预测方法;改进的极大似然的锅炉风机随机噪声非线性辨识方法,最小二乘支持向量的锅炉关键参数辨识及预测方法,改进的小脑模型神经网络对暂态电容电流的辨识方法。本书对这些方法均给出了理论证明,对提出的主要算法配有开发的程序。

本书可以作为计算机科学、信息科学、自动化、测控、机电一体化、材料和能源等专业的高年级本科生和研究生的教材,也可作为相关专业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

火力安全发电关键设备故障诊断/李宁,侯媛彬,赵建文著. —西安:西安电子科技大学出版社,2013.7
ISBN 978-7-5606-3070-0

I. ① 火… II. ① 李… ② 侯… ③ 赵… III. ① 火力发电—发电设备—故障诊断
IV. ① TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 129261 号

策 划 马乐惠

责任编辑 王 斌 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2013 年 7 月第 1 版 2013 年 7 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 11

字 数 252 千字

印 数 1~3000 册

定 价 22.00 元

ISBN 978-7-5606-3070-0/TM

XDUP 3362001-1

如有印装问题可调换

序 言

安全发电是发电厂生产经营和可持续发展的基础，煤矸石燃烧发电是火力发电的一种形式。我国有煤矸石发电厂近 200 座，安全发电受到科学家们的广泛重视。《火力安全发电关键设备故障诊断》一书从煤矸石安全发电角度出发，对其关键技术进行研究；在对影响煤矸石安全发电主要因素分析的基础上，确定了煤矸石发电厂循环流化床锅炉为安全发电的重要设备之一，提出其安全运行程度直接关系着发电厂安全生产状况。据此，给出了锅炉安全运行因素关联关系图，该关联关系图明确地反映出煤矸石安全发电的关键技术内容。总之，本书讨论的是对安全发电过程中关键设备故障分析与诊断研究的新理论和新技术。

本书的主要内容基于机器学习的理论和研究方法，其中所提出的“基于模糊多级支持向量机的运输机的故障预测方法、改进的极大似然的随机噪声非线性系统辨识方法、最小二乘支持向量的锅炉关键参数辨识及预测方法、改进的小脑模型神经网络对暂态电容电流的辨识方法”都属于有监督机器学习范畴。本书的内容有如下特点：

(1) 针对火电厂（煤矸石发电厂）的安全发电问题，基于机器学习的各种改进理论、故障诊断方法进行了研究，目前，基于各种改进理论机器学习理论的火电厂安全发电关键技术研究或煤矸石发电厂关键设备故障诊断类的书还很少见到；

(2) 研究了基于改进支持向量机监督学习的多变量多参数非线性系统的辨识、预测，以及基于最小风险的机器学习故障诊断方法，可推广到相关领域；

(3) 对提出的主要方法给出了理论证明，为深度研究支持向量机的和机器学习

习的读者提供了理论依据；

(4) 对所提出的主要算法配有开发的程序，为研究支持向量机的和机器学习算法的读者提供了理论参考。

本书在李宁博士和侯媛彬博导等三位作者完成的纵向、横向与故障诊断相关项目的沉淀中，在理论研究的基础上，增加了工程实用的基于支持向量机的故障诊断实例。本书对基于机器学习的主要方法及理论的证明科学严谨，实验及仿真数据可靠，算法配套的源程序内容翔实。

韩九强

2012 年 10 月于西安交通大学

前言

中国是煤炭大国,年产原煤约 32.4 亿吨,洗煤厂洗选量为原煤产量的 1/3,其中 15%~20%为排放的煤矸石、煤泥等劣质煤,利用这些劣质煤发电,统称为煤矸石发电。目前,我国有煤矸石发电厂近 200 座。煤矸石燃烧发电是火力发电的一种形式,安全发电是发电厂生产经营和可持续发展的基础。本书从煤矸石安全发电角度出发,对其关键技术进行研究。

由于煤矸石发电厂胶带机输送的煤矸石成块状,胶带输送机的工作状态具有随机性和非线性特性,针对胶带输送机这一特性,本书提出了一种基于模糊多级支持向量机(Fuzzy Multilevel Support Vector Machine, FMSVM)的输送机故障预测方法。经分析和统计获得了火力发电厂燃料胶带输送机的 10 种故障样本,将模糊理论的多维多重语句与支持向量机结合,从而构建了识别这种随机非线性问题的 FMSVM 规则核函数。本书以随机统计的实测数据集为训练样本,以该核函数为准则实现故障识别及预测,仿真验证了该方法的有效性,并找出了各个故障支持向量(Support Vector, SV)之间的耦合关系。该方法与常规的支持向量机(Support Vector Machine, SVM)故障识别相比,不仅克服了 SVM 具有对噪声敏感的不足,而且更省时。

针对煤矸石火力发电厂循环流化床锅炉风机非线性特点,本书提出了改进的极大似然估计(Improved Maximum Likelihood Estimation, IMLE)的随机噪声非线性系统辨识算法。该算法在极大似然辨识的损失函数的隐函数中寻极小值,从而可准确识别出在全局随机噪声扰动下非线性系统的参数。陕西黄陵煤矸石发电厂的一次风机辨识仿真结果表明,IMLE 算法辨识能准确辨识含有有色噪声的系统参数,与常规的递推极大似然方法比较,识别参数的误差小,且具有更快的收敛速度。根据辨识的参数,对发电厂一次风机进行了高压变频改造,运行测试表明,节能效率达 30%。

锅炉是煤矸石发电厂安全发电的关键设备之一,在分析研究锅炉系统主要部件的典型故障和隐含故障案例及其处理方法的基础上,本书针对锅炉引风机的烟气含氧量具有多因素影响的非线性特性,提出了最小二乘支持向量机(The Least Square Support Vector Machine, LS-SVM)的烟气含氧量模型辨识方法,利用非线性映射,将输入向量从原空间映射到一个高维的 Hilbert 空间,在这个高维空间中,采用损失函数最小的概念,利用原空间的 SVM 核函数取代高维特征空间的内积运算,从而将非线性函数估计问题转化为高维特征空间中的线性函数问题。通过用实测数据对影响锅炉稳定运行的关键参数:烟气含氧量、煤矸石流量和返料风压进行了辨识预测,结果表明,该方法精度较高(误差小于 7%);与基本的 SVM 比较,减少了计算量,而且将最小二乘、SVM 和调整神经网络径向基(Radial Basis Function, RBF)特征有机地统一起来。

在上述基础上,书中建立了基于免疫算法的协同控制方法,进而提出发电过程隐含故障预测与诊断方法,大量实测数据仿真验证了该方法的有效性。

本书对火电厂电气设备典型接地故障案例进行了分析,针对供电系统单相接地故障特征,提出了改进的小脑模型神经网络(Improved Cerebellar Model Articulation Controller, ICMAC)对暂态电容电流的辨识方法,并进行了仿真验证和评价;利用这一方法,针对电厂供电出现的问题,对电厂用电进行了重新核算与整定,避免了定值不准造成的故障再次发生,为电厂用电系统的安全可靠性提供了保障。

另外,本书还在对煤泥输送管道全程压力变化趋势的实验数据分析基础上,对煤泥管道输送技术进行了研究,通过输送管道全程压力变化趋势的实验数据分析,对煤泥输送中关键设备故障进行诊断、预测,给出了关键设备的故障检查、处理方法。

本书共分为8章,其中第7章及附录B由赵建文博士撰写,其余章节由李宁博士和侯媛彬教授(博士生导师)合作撰写。附录给出了开发的程序、实验平台及火电厂定值核算结果,其中附录A有13个与本书所提出的主要算法配套的开发程序,为研究SVM和机器学习算法的读者提供了理论参考。

本书在编写过程中得到了诸多专家的帮助,并得到了西安科技大学的“安全技术及工程”国家重点学科和“控制理论与控制工程”陕西省重点学科的资助,在此表示感谢!

本书还得到了西安交通大学、西安科技大学、西北工业大学、长安大学及西安电子科技大学出版社有关教师的支持,在此一并表示感谢。

由于编者的能力有限,书中难免存在不足之处,欢迎读者批评指正并提出宝贵意见。

编者

2013年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 安全发电	1
1.1.1 安全型企业	1
1.1.2 安全与风险管理的关系	1
1.2 电厂 DCS 系统是建设安全型企业的重要组成部分	4
1.3 火电厂技术的国内外研究动态和发展趋势	4
1.3.1 国际研究动态	4
1.3.2 国内研究动态	5
1.4 煤矸石发电现状	6
1.5 安全发电存在问题分析	7
1.5.1 从管理层面分析安全发电	7
1.5.2 从技术层面分析影响安全发电的薄弱环节	8
1.6 本书主要研究内容	9
1.6.1 技术路线	9
1.6.2 研究内容	10
第 2 章 影响煤矸石安全发电的主要因素分析	12
2.1 煤矸石发电厂的安全运行	12
2.1.1 提高设备安全性分析	12
2.1.2 “以人为本,防患于未然”的设想	13
2.1.3 安全闭环管理体系	13
2.2 锅炉安全运行的关联因素	14
2.3 从技术层面研究煤矸石安全发电方案设计	15
2.4 本章小结	16
第 3 章 煤矸石运输机的故障诊断	17
3.1 支持向量机的线性可分性	17
3.2 煤矸石仓到锅炉的生产工艺流程	18
3.3 煤矸石运输机常见故障分析	19

3.3.1 基于 FMSVM 的故障诊断方法.....	19
3.3.2 煤矸石运输机常见故障分析.....	20
3.4 基于 FMSVM 的煤矸石运输机故障诊断方法研究.....	21
3.4.1 基于 FMSVM 的故障诊断模型的建立.....	21
3.4.2 常用 SVM 的核函数.....	21
3.4.3 变参数的影响.....	22
3.4.4 FMSVM 的核函数的确定.....	23
3.5 仿真验证.....	24
3.5.1 基于 FMSVM 的核函数式的过载诊断.....	24
3.5.2 基于 FMSVM 的核函数式的过流诊断.....	25
3.5.3 过载和过流故障支持向量之间的关系.....	26
3.6 本章小结.....	27
第 4 章 煤矸石发电风机故障诊断与节能控制	28
4.1 基于改进的极大似然估计的随机噪声非线性系统辨识.....	28
4.1.1 风机识别的描述与分析.....	29
4.1.2 风机模型极大似然辨识分析.....	29
4.1.3 改进的极大似然算法.....	30
4.1.4 方法验证.....	32
4.1.5 方法评价.....	34
4.2 基于 RBF 神经网络的风机故障预测和诊断研究.....	34
4.2.1 RBF 神经网络训练.....	34
4.2.2 风机故障诊断分析.....	36
4.3 煤矸石电厂风机高压变频节能研究.....	37
4.4 本章小结.....	42
第 5 章 锅炉隐含故障及其关键参数的 LS-SVM 辨识	43
5.1 锅炉主要部件的典型故障分析.....	43
5.2 锅炉隐含故障分析.....	44
5.3 锅炉隐含故障案例及其原因分析.....	44
5.4 锅炉隐含故障的预测及其故障诊断研究.....	46
5.4.1 锅炉隐含故障处理方法.....	46
5.4.2 锅炉隐含故障关键参数分析.....	47
5.4.3 煤矸石燃料锅炉燃烧的关键参数确定.....	49
5.4.4 循环流化床锅炉的关键参数物理建模.....	50

5.5	最小二乘支持向量机的烟气含氧量模型辨识研究	51
5.6	最小二乘支持向量机的锅炉关键参数辨识及预测	54
5.6.1	煤矸石流量辨识及预测	55
5.6.2	返料风压的辨识及预测	57
5.6.3	烟气含氧量的辨识及预测	59
5.7	基于改进的 BP 神经网络的循环流化床锅炉烟气含氧量预测	63
5.8	本章小结	66
第 6 章 基于免疫协同算法的发电过程控制及隐含故障诊断		
6.1	综合优化算法整体方案设计	67
6.2	三种隐含故障的分析与建模	68
6.3	基于免疫算法的联合协调控制	70
6.4	锅炉关键参数的隐含故障诊断方法研究	74
6.5	本章小结	78
第 7 章 电气典型接地故障及其诊断保护研究		
7.1	电气设备典型接地故障及其处理方法案例	79
7.1.1	机组接地故障分析报告	79
7.1.2	电气误操作接地事故分析报告	80
7.2	供电系统单相接地故障特征分析与辨识	81
7.2.1	单相接地故障暂态电容电流分析	81
7.2.2	基于 BP 神经网络的暂态电容电流辨识	82
7.2.3	ICMAC 神经网络对暂态电容电流的辨识	84
7.2.4	方法评价	88
7.3	厂用电定值核算	89
7.3.1	定值核算及厂用电系统基本概况	89
7.3.2	低压 0.4 kV 负荷核算	90
7.3.3	高压 6 kV 负荷核算	93
7.3.4	电动机继电保护定值核算	94
7.3.5	变压器继电保护定值核算	100
7.3.6	线路继电保护定值核算	103
7.4	本章小结	104
第 8 章 煤泥输送系统的故障诊断		
8.1	煤泥输送系统工艺流程	105

8.2	煤泥输送关键技术	106
8.3	煤泥输送系统故障诊断方法	107
8.4	煤泥输送管路全程压力变化趋势的实验数据及分析	110
8.5	经济效益分析	115
8.6	本章小结	115
附录		116
附录 A 火电厂关键设备故障诊断程序及其注释		116
附录 B 厂用电定值核算结果——定值清单		136
附录 C 火电厂安全发电关键设备及其控制流程图		148
附录 D 关于火力发电关键设备及其控制流程的说明		158
参考文献		160
1. 煤泥输送系统故障诊断与智能控制 陈小章 2008 2. 基于改进的极大似然估计的煤泥输送非线性系统辨识 28 3. 1.1 煤泥输送系统故障诊断 突和叶碧清等及其相关文献 2008 4. 1.2 煤泥输送系统故障诊断分析 周家志等及其相关文献 2008 5. 1.3 改进的极大似然算法 吉星等 2008 6. 1.4 方法验证 吉星等 2008 7. 1.5 方法评价 吉星等 2008 8. 2. 基于RBF神经网络的煤泥输送故障诊断 吉星等 2008 9. 2.1 RBF神经网络训练 吉星等 2008 10. 2.2 煤泥输送故障诊断 吉星等 2008 11. 3. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 12. 本章小结 吉星等 2008 13. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 14. 1. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 15. 2. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 16. 3. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 17. 4. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 18. 5. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 19. 6. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 20. 7. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 21. 8. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 22. 9. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 23. 10. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 24. 11. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 25. 12. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 26. 13. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 27. 14. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 28. 15. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 29. 16. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 30. 17. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 31. 18. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 32. 19. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 33. 20. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 34. 21. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 35. 22. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 36. 23. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 37. 24. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 38. 25. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 39. 26. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 40. 27. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 41. 28. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 42. 29. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 43. 30. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 44. 31. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 45. 32. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 46. 33. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 47. 34. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 48. 35. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 49. 36. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 50. 37. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 51. 38. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 52. 39. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 53. 40. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 54. 41. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 55. 42. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 56. 43. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 57. 44. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 58. 45. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 59. 46. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 60. 47. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 61. 48. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 62. 49. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 63. 50. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 64. 51. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 65. 52. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 66. 53. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 67. 54. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 68. 55. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 69. 56. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 70. 57. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 71. 58. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 72. 59. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 73. 60. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 74. 61. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 75. 62. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 76. 63. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 77. 64. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 78. 65. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 79. 66. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 80. 67. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 81. 68. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 82. 69. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 83. 70. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 84. 71. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 85. 72. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 86. 73. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 87. 74. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 88. 75. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 89. 76. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 90. 77. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 91. 78. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 92. 79. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 93. 80. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 94. 81. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 95. 82. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 96. 83. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 97. 84. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 98. 85. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 99. 86. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 100. 87. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 101. 88. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 102. 89. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 103. 90. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 104. 91. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 105. 92. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 106. 93. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 107. 94. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 108. 95. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 109. 96. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 110. 97. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 111. 98. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 112. 99. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008 113. 100. 煤泥输送系统故障诊断 吉星等 2008		

第 1 章

绪 论

煤矸石属于煤炭生产和洗选加工过程产生的废弃物。我国诸多的煤矿每年都产生大量的煤矸石,这些被废弃的煤矸石不仅占用土地资源,而且经过日晒雨淋后会产生自燃,释放出含有 SO_2 的大量烟气污染环境。煤矸石发电厂采用国际先进的循环流化床(CFB)锅炉技术,使煤矸石在锅炉床面充分燃烧后发电,可以减少环境污染;同时,将废弃资源变废为宝,可有效地降低生产成本,提高产品附加值。煤矸石燃烧发电是火力发电的一种形式,安全发电是发电厂生产经营和可持续发展的关键,可见建立安全型企业、做好安全发电意义重大。

1.1 安全发电

1.1.1 安全型企业

安全工作伴随着企业生产的全过程,是企业生存的基石,安全管理从对事故由被动接受到积极事先预防,是安全认识上的一大进步。国内的专家对安全型矿井做了大量的研究^[1-5],也有专家对电力企业的安全问题做了深入研究^[6-11],这些都为本书的研究提供了参考。

“安全型企业”具有四大基本特征:一是人的安全可靠;二是物(如机器设备等)的安全可靠性;三是系统的安全可靠性;四是制度规范、管理科学。这些特征体现了安全管理从传统管理、经验管理迈向科学管理、文化管理的阶段。

科学的安全管理以切断事故发生的因果链为根本目标,以预控为核心,以危险源辨识和安全管理标准、管理措施为基础,能使企业的安全状况得到根本改善,是一种现代的管理理论和方法。

安全管理的最终目标是通过以风险预控为核心的、持续的、全面的、全过程的、全员参与的、闭环式的安全管理活动,在生产过程中做到人员无失误、设备无故障、系统无缺陷、管理无漏洞,进而实现人(人员)、机(设备)、法(管理)、环(环境)的安全,从而实现杜绝已知规律的生产事故的发生。

1.1.2 安全与风险管理的关系

风险管理过程主要包括:危险源辨识、危险源风险评价、危险源风险预控、危险源监

测、危险源风险预警与控制等。

1. 危险源辨识

危险源辨识是安全发电管理的前提和基础，其目的是在发电安全事故机理分析的基础上，结合本企业实际的人员配备条件、机器装备条件、自然地质条件等，综合运用事故树分析法、安全检查表、问卷调查法、标准对照法以及工作任务分析等危险源辨识方法，系统地辨识存在于发电过程的危险源以及起因和后果。危险源辨识首先要对发电企业的所有部门进行合理划分，确定基本危险源辨识的子单元，然后确定哪些因素属于危险源范畴，以便开展辨识工作。危险源辨识的基本内容包括人、机、法、环四个方面，所使用的主要方法有工作任务分析法和事故致因机理分析法，其工作流程主要包括五个步骤：① 制定总体指导方案；② 人员培训；③ 开展危险源辨识工作；④ 资料整理、归档；⑤ 危险源信息化管理。

2. 危险源风险评价

发电企业危险源风险评价是分析危险源产生风险的大小。根据评价目的和实施阶段不同可分为静态风险评价和动态风险评价两种。

静态风险评价是对企业辨识出的基本危险源逐个进行定量分析，以确定其引发的风险发生的可能性及损失的范围和程度，主要方法有风险矩阵法等。由于在发电企业危险源体系中有一些危险源具有时间记忆性，其重复出现或持续存在造成的风险大小是不同的，因此，需要对危险源进行动态风险评价。危险源动态风险评价是对危险源进行风险预警和风险控制的前提，动态评价的方法随评价对象(人、机、法、环)的不同而发生变化。

英国的专家 J.P.Sanchez 和 C.Colombo 等在“Multicriteria comparison among several mitigation strategies for dangerous near-earth objects”^[12]一文中针对飞行器靠近地面目标的随机性，模拟并比较了太阳能接收器、拦截机、撞击器等集成驱动器，提出了多级判断势态优化方法，构建了其结构和预警系统。德国的专家 Weiher Hermann, Specht, Eckard 在“Determination of the cable factor for deviated tendon bundles”^[13]一文中针对铠装电缆在使用中的危险故障，从电缆的疲劳性分析提出了电缆最大负荷的估计方法；从电缆横截面的二维计算研究如何估计铠装电缆芯中的各金属导线和绝缘外套管之间的压力，为避免大功率的电缆故障提供了参考。

国内专家对危险源的评价进行了大量研究，赵志慧对企业安全风险评价方法进行了探讨^[14]，他认为企业安全风险评价的建立能为企业的安全管理和考核提供依据，是企业提高安全素养和制定事故预防措施的基础。对照职业健康安全体系中的风险评价，分析了两种风险评价的区别，指出在风险评价时，必须考虑企业已采取的安全控制措施及其有效性，而且最终必须确定风险是否在企业可容许的范围内。秦彦磊对煤矿井下危险源动态风险评价与安全辅助决策支持系统进行了研究^[15]，在分析对煤矿井下危险源评价模型的基础上，提出了危险源风险评价决策支持系统的设计和试探性的开发方案。张晓瑜和兰涛结合工程实例所进行的研究，目的在于为 LNG 项目环境风险评价提供一种思路^[16]，为类似工程的环境风险评价工作提供一定的经验。他们通过环境风险导则中要求的风险识别、源项分析、风险值计算、风险防范措施等方法，确定 LNG 项目罐区为重大危险源，主要风险事故类型为 LNG 储罐泄漏及火灾、爆炸事故，最后要求项目建设时必须采取有效的防范、减缓措施，

制定突发性事故应急预案,强化安全管理。李建海通过危险源辨识、风险评价和风险控制策划,消除系统中危险源或降低危险源所带来的风险^[17],对重大危险源做到超前、预防性控制,杜绝各类重大事故的发生,保护职工安全与健康,提高安全管理水平,建立安全长效机制。

3. 危险源风险预控

发电企业风险预控是指企业根据基本危险源辨识和静态风险评价的结果,利用一定的技术手段和管理措施,控制或消除可能出现的危险源(隐患),预防风险的出现,遏制事故的发生。发电企业风险预控不同于隐患消除,隐患消除是在实际出现了危险源之后对其进行控制或消除,而风险预控是对发电企业辨识出的可能会出现但尚未出现的危险源进行预防性的控制或消除,对于重大危险源要将其风险程度降到最低,而对于经常性危险源要彻底消除,使其没有发生的条件。风险预控的方法有技术方法和管理方法。

4. 危险源监测

发电企业危险源监测是指在生产过程中对已辨识出的危险源进行实时或定期的监测、检查,并及时向管理部门反馈危险源状态的动态信息。危险源监测包括两个方面的内容:

(1) 危险源动态监测与动态信息采集。

(2) 危险源动态信息传递。监测的方法应依据危险源的特征实行定时监测或实时监测。

5. 危险源风险预警与控制

危险源风险预警与控制的简单流程为:危险源动态信息采集→信息传递→动态风险评价→发出风险预警→处理措施。国际上有不少专家致力于这方面的研究,例如,印度的 S Masi, C Molaschi 在“Key factors sensitivity analysis on blowout probability in dangerous drilling conditions applying different technical solutions”^[18]一文中对危险钻探开采中应用不同技术造成井喷灾害的主要因素进行了分析。德国的 V Pacary, Y Barré, E Plasari^[19]对清除核废料的危险进行了预测。还有 Tan Wen-Hui, Gao Dan-Qing^[20], Su Zhaogui, Jiang Zhongan 等^[21]; Curtis, T Michael 等^[22]; A N Nazarov, M M Klimanov 等^[23]; K Cocx Tim, Kosters A Walter^[24], Bourgeau-Chavez, L Laura^[25]等对高速公路及其他领域的危险源进行预测。国内的李文等对煤矿危险源风险预警与控制都进行了较深入的研究^[26],根据现代安全管理理论与方法,结合煤矿“人、机、法、环”特点和不同煤矿事故的发生机理;对煤矿危险源风险预警和控制的基本理论和方法进行了探讨,提出了基于危险源的煤矿风险预警与控制的一般流程,给出煤矿危险源辨识、风险评价、监控和预警的方法,为煤矿安全管理信息系统提供了理论基础。孙金凤等通过对比分析安全生产领域多发生事故预警模型的优缺点,总结了事故预警模型的发展趋势,提出了基于模糊综合评判技术和动态模糊神经网络技术的重大危险源事故风险预警模型^[27],详细陈述了其构建过程,最后对液化石油气蒸气云爆炸事故应用该模型,得到了较好的预测效果,实现了风险程度的定量化预警。该预警模型具有快速的自学习能力和容错能力,能够同时处理多种风险因素、自动生成模糊规则并满足预警系统的实时性要求,可应用于重大危险源在线监控预警系统,为企业端和政府端监管者提供有效的重大危险源事故风险定量化预警信息,为遏制重大灾难事故的发生,减少死亡人数、受伤人数和直接经济损失提供先进的理论和技术支撑。周蓉在企业安全事故风险预警体系研究中主要从预警体系的功效、预警体系构建原则、预警的程序、风险预警分析

的模型和预警体系结构五个方面对企业安全风险预警技术进行了研究^[28]。通过对企业可能出现的危险态的实时监控,采取层次分析法和模糊评价法对风险指标进行处理,具体确定危险源的存在状态,并根据实时存在的危险态的风险等级给出相应警示信息,提示相关部门采取措施。与预警功能相对应的预警组织结构,主要设计为三级组织结构,分别是企业安全生产管理委员会、预警职能部门和生产部门,通过这三级结构来保证风险预警系统功效的实现,使企业安全事故风险预警系统能够得到预期的实施效果。

1.2 电厂 DCS 系统是建设安全型企业的重要组成部分

分布式控制系统(Distributed Control System, DCS)在国内控制行业称为集散控制,是一个由过程控制级和过程监控级组成的,以网络为纽带的多级计算机控制系统,被广泛地应用在发电厂控制之中,其基本思路是分散控制、集中操作、多级管理、配置灵活、组态方便。电厂 DCS 系统的建设方案应具有:性能稳定、质量可靠、故障应急、经济实用等特点,并且方便扩展、可与数字电子信息系统实现无缝连接,可实现动态高科技可视化安防管理功能,符合安全型企业的要求,具体描述如下。

(1) 可扩展性:设计的 DCS 系统是开放性系统,在系统需要扩展时,前端设备数量可灵活地增加,且不改变系统的运行方式,保证了用户的安全。

(2) 先进性:电厂 DCS 系统应尽量采用先进技术和新产品,保证系统的先进性。

(3) 可靠性:系统的可靠性是第一位的,在方案设计中必须充分考虑系统的安全可靠性,依照国家有关安全标准,采取相关安全管理措施,保证监控系统安全、可靠运行。

(4) 故障应急:安全型电厂的 DCS 系统应具有故障应急能力,一旦某个生产环节发生故障,应在最短的时间内恢复生产。

(5) 经济性:系统具有良好的性能价格比。

(6) 实用性:采用高科技手段,进行智能化设计,尽量减少系统操作的复杂性,做到系统工作稳定可靠,维护简单;软件使用界面友好,完全达到智能化控制,实用性高。

电厂 DCS 系统组成包括监控前端、传输系统、监控中心、监控终端等部分。此外,根据监控传输方式的不同,其可以分为有线监控和无线监控。

1.3 火电厂技术的国内外研究动态和发展趋势

1.3.1 国际研究动态

国际专家对于废料发电、电厂锅炉风机故障检测、电厂引风机和送风机的配合问题进行了深入的研究。匈牙利米什科尔大学的 A Sz Váradi 和 J Takács 在“Electricity generation from solid waste by pilot projects”^[29]一文中讨论了由试点项目研究固体废料发电问题,该项目在 1150℃ 的高温下 180 t 固体废料可以发电达到 144 MW/h,并将发出的电并网用于厂内工业泵,降低了火电厂的发电成本。日本长崎大学的 Matsui, Nobmasa, Kurokawa, Fujio 在“New method for controlling large fan of thermal power plant boiler using inverter in

abnormal state”^[30]一文中,提出一种火电厂锅炉在异常状态下采用逆变器控制风机的方法,当使用一台逆风机为一个逆变电源存储能量时,传统的方法测量不到事故情况下的异常状态,由仿真能够估计出这种控制器,并在 0.5 s 内能从逆变器变换到电源,仿真其暂态响应,测量误差小于 3.4%。印度加尔各答大学的 M S Bhowmick, S C Bera 在“Study the performances of induced fans and design of new induced fan for the efficiency improvement of a thermal power plant”中论述了发电厂引风机和送风机配合设计,如何提高效率的问题^[31]。还有国际诸多专家研究、设计、进一步开发应用或改造电厂的 DCS 系统,取得了成功。例如, Bae Kwan-Sik 在“System improvements enhance the reliability of the power plant distributed control system (DCS)”中论述了韩国西部热电厂 2005 年对 2001 年建成的 4 台(500 兆瓦/台)的汽轮发电机的 DCS 系统进行改造,在检查每个 DCS 模块,分析造成信号缺失的基础上,不仅更换了系统部分远程控制网络信号线,还更换了控制诊断有问题的控制模块,另外,对各个 DCS 模块进行了升级,对各控制单元的控制柜气孔增加了防尘设施,加强了通风,消灭了通信出错问题,提高了控制效果^[32]。Leimbach, A Roger 在“Power plant automation where we are and where we're headed”中论述了美国亚利桑纳州斯科茨代尔(市)电厂十年建设中 DCS 系统的软件改造及其硬件集成过程^[33]。Liu Hong, Gu Xiaohong 和 L N Modran 对发电机的控制参数进行在线自适应地调整满足 DCS 系统的要求,从而提高了功率因数^[34, 35]。

1.3.2 国内研究动态

国内也有很多专家对电厂的 DCS 系统做了大量的研究。例如,藏志刚等在《火电厂 DCS 系统改造方案》^[36]中,针对火电厂系统的产品现状,分析了不同模式的优缺点,论述了火电机组 DCS 系统改造方案的几个方面;在一体化的 DCS 改造时,充分考虑全厂信息化建设的需要,预留与 SIS(厂级信息监控系统)及 MIS 连接的接口。呼和浩特热电厂 DCS 系统改造提高了火电厂运行管理水平,增强了电厂在电力市场上的竞争能力。王志峰在《DCS 系统及其在电厂的应用改造》^[37]中,论述了 DCS 系统的结构及配置特点,提出了控制系统设计原则与要求,讨论该系统在电厂的应用中存在的问题;提出了优化方案,并举例分析。赵妮娜在《DCS 应用中的关键问题探讨》^[38]中,总结了 DCS 系统工程实际应用中,在布线、接线、电源等方面的经验。韦延俊等在《韶关发电厂 8# 机组 DCS 系统网络优化》^[39]中,针对广东韶关发电厂 8# 机组 DCS 系统所存在的冗余控制器(DPU)离线和各站系统(MMI 站)死机或自动重启问题进行研究,通过网络升级改造,将原有的网络采用双令牌的环式的(FDDI/CDDI)网络移植到快速以太网(FE),最终解决了 DCS 系统的冗余控制器(DPU)离线、各站系统(MMI 站)死机或自动重启这些顽症。郭新年等在《浅析发电厂 DCS 系统干扰及防范》^[40]中,分析了发电厂存在的各种各样的干扰,这些干扰对发电厂中的电子设备,特别是对以集成电路为基础的控制设备、仪器仪表、计算机、集散控制系统(DCS)设备的安全运行造成的危害,并重点介绍发电厂干扰的产生原因及一些防范措施。曾钢翎在《浅析沙角 C 电厂 2# 机组汽机紧急跳闸系统(ETS)改造》^[41]中,介绍了沙角 C 电厂在 2# 机组热控 DCS 升级改造期间,同时进行了汽机紧急跳闸系统(ETS)的 DCS 一体化改造情况,分析了 ETS 组成、功能的设计特点及 ETS 改造后取得的成效,通过沙角 C 电厂 2# 机组 ETS 与 DCS 的一体化改造,以安全可靠、典型的双机冗余保护方式替换了原系统 ALSTOM 专用卡件独特的跳闸回路检测功能,解决了原系统昂贵的备品、备件问题,大大

提高了电厂经济效益；机组启动前系统经过多次试验，一次启动成功，运行正常且 ETS 控制设备零故障，减轻了维护人员的劳动强度，提高维护、检修工作的效率。曲小秋等在《热电厂 DCS 控制系统锅炉工艺上位机组态设计》^[42]中，针对电厂循环流化床锅炉的控制涉及温度、压力、流量、电机、阀门等设备的综合调节和操作，采用 Cimplicity 软件完成 DCS 系统锅炉工艺的上位机组态的设计，实现了锅炉工艺总流程图的组态、现场数据监控、数据记录、趋势曲线、参数报表、报警光字牌和连接 Microsoft Access 数据库及其设计等用户所需要的功能，并进行了上位机与下位机的联机试验，完成了热电厂 DCS 控制系统锅炉工艺的上位机组态设计，实现了锅炉工艺过程的数据监控、参数报表、实时数据曲线记录、历史数据曲线记录和报警光字牌等功能，还完成了数据监控画面与手操器的连接以及 Microsoft Access 数据库的相关设计。工作人员通过三台计算机中的任何一台就可以查看系统的运行情况，参数变化的曲线实时趋势、历史趋势；如果出现报警，工作人员能够及时地发现是哪个参数出现问题，并及时进行参数的修改，大大提高了劳动效率。

以上研究成果对研究煤矸石安全发电提供了帮助和启示。

1.4 煤矸石发电现状

煤矸石大量堆放，不仅压占土地，而且影响生态环境，其淋溶水会污染周围土壤和地下水，同时煤矸石中含有一定的可燃物，在适宜的条件下会发生自燃，排放 SO_2 、 NO_x 、 CO_x 和烟尘等有害气体污染大气环境，影响周边居民的身心健康。自 20 世纪 60 年代起，很多国家开始重视煤矸石的处理和利用：日本有 10 多座煤矸石发电厂；英国、比利时等国不仅采用煤矸石发电，还有专用煤矸石代替硅质原料生产水泥的工厂。

从煤炭开采来看，中国每生产 1 亿吨煤炭，排放煤矸石 1400 万吨左右；从煤炭洗选加工来看，每洗选 1 亿吨炼焦煤，排放煤矸石 2000 万吨，每洗 1 亿吨动力煤，排放煤矸石 1500 万吨。2010 年，国内各类煤矿生产原煤 32.4 亿吨，煤矸石产量为 3.8 亿吨；煤炭加工洗选量约为 10 亿吨，煤矸石、洗中煤和煤泥产出近 3 亿吨(其中煤矸石 1 亿吨)。目前，全国有较大煤矸石山 1600 余座，占用土地约 1.5 万公顷，堆积量少说也累计达 50 多亿吨(占中国工业固体废物排放总量的 40%以上)，130 多座煤矸石山在自燃。我国煤炭企业利用煤矸石发电已有十几年的历史了，为了节约能源，国家一直鼓励充分利用废弃的煤矸石，特别是洗煤厂的尾矿——水洗矸和煤泥作为燃料发电，并制定了有利于煤矸石发电产业发展的政策。从 20 世纪 80 年代至今，已有不少煤矸石电厂投入运行，取得了很好的效果。煤矸石发电是煤矸石资源综合利用，创造经济、环境、社会效益相统一的最有效途径，也是煤矿发展煤矸石综合利用的重要举措和途径，已形成了较大规模，并成扩张之势。

目前，我国煤矸石、煤泥综合利用电厂装机容量为 2600 多万千瓦，年发电量为 1300 多亿千瓦时，年利用煤矸石、煤泥为 1.3 亿吨；利用煤矸石制砖等建筑用墙体材料，折合标砖约为 120 多亿块/年，煤矸石利用量约为 3600 万吨；利用煤矸石和粉煤灰制造水泥生产能力为 1250 万吨/年，利用煤矸石为 300 万吨/年；其他耗用为 150 多万吨；另外，用于井下充填、复垦造田、筑路等处理的煤矸石为 1 亿多吨，总计利用和无害化处理煤矸石约 2.7 亿多吨，占当年煤矸石排放量的 56%。