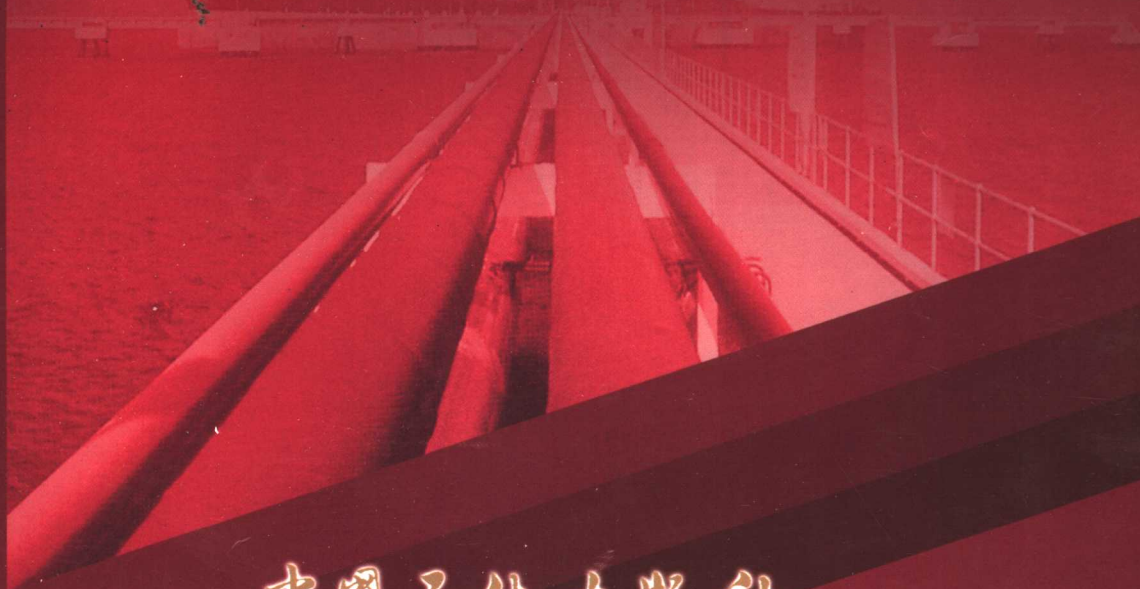


缺陷管道 适用性评价技术

赵金洲 喻西崇 李长俊 著



中国石化出版社

缺陷管道适用性 评价技术

赵金洲 喻西崇 李长俊 著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书成功地将 BP 神经网络、遗传算法和模糊逻辑进行合理、有效地改进,充分利用 BP 神经网络强大的训练和学习功能、遗传算法强大的全局优化功能和模糊逻辑强大的解释和推理能力,将三者有机结合起来,形成一些新的模糊遗传神经网络。然后将这些新的模糊遗传神经网络用于缺陷管道的腐蚀影响分析、腐蚀程度评价、腐蚀速率的预测、腐蚀缺陷尺寸的确定、剩余强度评价、剩余寿命预测、可靠性分析等各部分。本书内容新颖丰富,与工程实际结合密切,同时还给出了大量的实例分析。本书可供从事陆上及海上油气长输管线工程、注水开发以及油气田钻井等工程技术人员参考;也可作为有关高等院校进行压力容器与管道研究、设计与可靠性分析以及风险管理等方面学习的本科生和研究生的选修课教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

缺陷管道适用性评价技术/赵金洲,喻西崇,李长俊著.
—北京:中国石化出版社,2005
ISBN 7-80164-720-3

I. 缺… II. ①赵…②喻…③李… III. ①石油
管道-腐蚀-评价②天然气管道-腐蚀-评价
IV. TE988.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 021459 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

北京宏伟双华印刷有限公司印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 16 开本 14 印张 354 千字
2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月第 1 次印刷

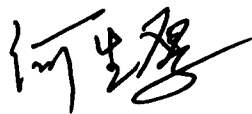
定价:45.00 元

序

腐蚀是油气生产和输送过程中潜在的危害之一。每年由于腐蚀发生的各种事故频繁发生,造成了巨大的经济损失和人员伤亡,制约了整个油气田的正常生产和运营。而现有的管线大部分已服役了 20 多年,管道因腐蚀破坏而造成的穿孔泄漏事故时有发生,如何对油田在役管道实行定期检测以便及时发现问题,采取措施,延长寿命,提高安全可靠,已成为我国油气田降低石油和天然气生产成本的关键所在。

目前国际上正在流行的适用性评价技术(Fitness for Service or Fitness for Purpose Assessment)就是对含有腐蚀缺陷的管道是否继续使用以及如何继续使用的定量评价,对含有腐蚀缺陷的管道的未来发展、管道的检测周期及维修周期等重要参数的定量评价;目前国内外的适用性评价技术还刚刚起步,还很不完善,而且大都是基于国内外常见的标准和规范,众所周知,这些标准和规范都有一定的适用范围和局限性,很多都是图表格式,使用起来极不方便。神经网络、遗传算法、模糊逻辑以及灰色理论等已经成功地用于自动控制、优化计算以及预测等等方面,但这几种先进的技术理论都不是十分成熟,都有各自的适用范围和约束条件,本书最主要的贡献是将目前国际上比较流行的这些技术有机地结合起来,取长补短,形成一些新的混合型的计算方法,然后成功地用于腐蚀管道的腐蚀影响因素预测以及适用性评价,可以说是现代高速计算机发展的必然结果。相信本书的出版,对我国相关领域的研究者会有所启发和帮助。

本人很高兴这本著作的问世,也乐为之序。



2005 年 3 月

前言

油气管道是我国国民经济的大动脉,管道安全与否与人民生活息息相关。目前我国铺设的输油和输气管道已达 300 万 km,其中油气长输管道 1.8 万 km。近年来天然气管道发展迅速,特别是耗资 56 亿美元、全长 4023km 的西气东输管道已顺利建成,之后再通过 322km 长的管道与北京相连。同样意义深远的还有中国石油天然气集团公司所建全长 1344km 的四川忠县——湖北武汉的忠武线,年输天然气 30 亿 m^3 ,2005 年年中开始满负荷运行。正在建设或将开工建设的有陕京二线。中国海洋石油总公司还计划用 10~15 年时间建成沿海岸线管道,将南海—珠江三角洲经济区、东海—长江三角洲经济区、渤海—环渤海经济区连接起来,管道总长估计在 2000km 以上。在经济发达国家的输油管道中,成品油管道就长度而言已远远超过原油管道。2002 年 8 月,我国兰成渝成品油长输管道顺利投产,目前正在平稳运行。大西南成品油管道(茂名——昆明)正在筹备中,预计不久将开始施工。我国大型炼厂大多数沿海、沿江建设,成品油管道发展的总趋势是由炼厂向内地辐射,成品油管道总长到 2010 年估计会接近上万公里。中俄原油管道不久将会开工建设,该管道起自东西伯利亚的安卡尔斯克,由中国内蒙古自治区的满洲里入境,直达大庆的林源首站,全长近 800km,一期输量为 $2000 \times 10^4 \text{t/a}$,2005 年投产;二期输量为 $3000 \times 10^4 \text{t/a}$,2010 年投产。

管道自投产至其使用寿命终结,其事故率一般遵循浴盆曲线。在投产初期,管道在设计、施工、管材、设备等诸方面的不足逐一暴露出来,因此事故率较高。随着运行时间的延续,各方面不断完善,事故率逐渐下降至较低水平,这一阶段称之为投产初期阶段,这一阶段通常为 0.5~2 年,在其后的一个阶段,事故率一直平稳地保持在低水平,为一条与纵坐标平行的线,称之为事故平稳期,通常可达 35~40 年。在此之后,事故率呈上升态势。我国油气管道 60% 以上已运行多年,有的已运行二三十年,爆管事故时有发生。有些管道将陆续进入老龄期,而大批新建的管道正处于幼年期,这两个阶段都是事故的高发期,因而面临的安全问题是十分严峻的,对这些老管道的安全评价工作迫在眉睫,对其进行适用性评价具有重大技术经济意义和社会效益,涉及内容主要包括失效机理分析、剩余强度评价、剩余寿命预测、风险评价,制定科学合理的管线维护方案。根据缺陷的长大规律、缺陷尺寸、载荷和环境参量、材料性能和工况条件,评价管道在当前运行工况条件下能否安全运行,提供管道升压、降压和维修、更换指南,确定管道的检测与维修周期,从而达到保证国家生命线工程的安全运行。

世界主要工业发达国家从 20 世纪 80 年代就开始了老输油(气)管线进行适用性评价研究工作。目前已有的资料显示,美国、西欧等国家已对国内陆地、海底管线的失效及失效原因进行了充分调查,按管线在各种环境条件下的失效概率进行了分类,建立了管线失效数据库,构造了适用于油气管道运行风险评价的各种计算模型,制定了一套实用性强的管线安全

管理方案,将油气输送管线的运行情况、病态产生和发展过程置于管道公司的日常监管之中,实时地进行检测,做到对管线实施计划性、针对性维修,从而避免了油气管道的大量突发性事故,在管道运行管理中取得了重大的经济效益,如美国在石化工业中采用适用性评价标准每年节约10亿美元以上,英国适用性评价标准的采用,也取得了可观的经济效益。我国在这方面的研究工作起步较晚,到90年代初才开始有少量的研究论文面世,但多数属于国外研究成果综述和一些定性的讨论。

20世纪80年代以来,随着断裂力学的发展,国际上逐步发展形成了兼顾安全可靠性和经济性的适用性评价方法。具有代表性的有:CEGBR6“含有缺陷的结构完整性的评价”(1988);英国BSIPD6493(1991)“焊接结构缺陷可接受性评价方法指南”;ASME Section XI“核电站构件在役检测规范”(1995)等。这些方法主要是针对裂纹型缺陷的安全评价方法。多数采用了失效评价图(Failure Assessment Diagram)技术。采用失效评价图进行适用性评价的概念是在1975年提出来的,失效评价图提供了一种方便的评价结构由脆断至塑性失稳(崩溃)整个范围的失效风险评估方法。失效评价图的Y轴(K_I 轴)代表结构对脆性断裂的阻力,而X轴(S_r 轴)代表结构对塑性失稳的阻力。失效评价曲线(FAC)插在这两极限失效模式之间。由失效评价曲线和 $S = S_r^{\max}$ 的竖线构成。当前,国际上适用性评价方法研究的热点之一是概率断裂力学的应用。概率断裂力学是断裂力学与可靠性理论的工程应用和相互渗透的结果,研究当应力、强度、缺陷尺寸及环境因素为随机变量时,结构在给定寿命下的破坏概率和可靠度。国际上发展的以概率断裂力学为基础的适用性评价方法有美国空军提出的飞机结构抗疲劳开裂的耐久性评价方法,英国Rolls-Royce公司用于航空发动机的数据库方法,美国西南研究院(SWRI)的应力下随机结构的数值评价(NESSUS)等等。适用性评价方法研究的另一热点是含体形型缺陷结构的完整性评价。

国内在80年代初,由机械工业部和化学工业部组织全国20个单位开展了“压力容器缺陷评定规范”的研究和编制,形成了CVDA-1984。80年代后期,国际上结构完整性评价方法的研究和发展十分迅速,CVDA-1984已明显落后。油气管道在国民经济中占有十分重要的地位,在役管线的安全评价工作十分必要,但到目前为止,还没有一套完整的完全适用于油气管道的适用性评价方法。虽然油气管道的适用性评价可参考现有标准、规范或推荐做法,但有许多地方需要结合油气管道的实际情况,进行修改和完善。“九五”期间,中国石油天然气总公司和国家技术监督局联合组织了“油气管道检测与安全评价技术研究”国家重点科技攻关项目。

李鹤林、冯耀荣等人引入了管线适应性评价方法(Fitness for Service or Fitness for Purpose Assessment),现代工业发展的趋势是结构的大型化、高参数,油气输送管道的发展趋势是大口径、高压输送和海底管道厚壁化。这一方面可能对结构的安全可靠性和使用寿命构成威胁,另一方面对材料、工程质量的要求更高、更严。在这种情况下,对结构的强度、寿命和安全可靠性的判断需要一套完整的判据和方法。工程上有两类标准,一类是建造标准或质量控制标准,主要以工程实践经验为基础,用于产品质量、安全性控制。另一类是以“适用性”或“合于使用”为原则的标准,是以断裂力学(包括概率断裂力学)、弹塑性力学、材料科学、可靠性系统工程为基础的严密科学的标准。后者兼顾结构的安全可靠性和经济性,可

获得巨大的经济效益。建造标准适用于结构安装运行前的质量控制。结构安装运行后,制造工艺或运行损伤造成的缺陷会暴露出来,如依据质量控制标准判断,会导致巨大损失,这时应采用以“适用性”为原则的标准。

西南石油学院近几年已在油气管道可靠性分析、剩余强度、寿命预测、风险评价等方面做了大量的研究工作,组织和参加了这一方面的国家自然科学基金项目、国家攻关项目、国家重点实验室开放基金项目、部省级项目和油气田重大项目近 100 项的科研攻关,取得了一系列成果。

张鹏、陈利琼等人完成了长输管线风险技术、腐蚀管道剩余寿命的性能衰减模型、失效相关下串联和并联工程系统的可靠性向量方法等方面的研究,提出了基于风险的油气管道最优完整性维护决策。

李长俊、罗明等人利用有限元分析方法,建立了管线腐蚀缺陷剩余强度分析非线性分析模型,该模型综合考虑了管道几何尺寸、位置以及管道鼓胀效应的影响,可用于管线剩余强度的精细评价。采用模糊识别技术,通过提取影响管道剩余强度的特征因子,在统计和现场调研管道当前的使用状态后,提出适当的隶属度函数和权重分配数及阈值水平上限。在此基础上以阈值上限对花——格管道的腐蚀重点区域的管段剩余寿命进行了模糊识别。

姚安林、李又绿等人参照国外管道风险管理原理、等级划分的原则,利用管线的管壁腐蚀程度数据和历史事故的统计分析资料,制定出了符合中国国情的天然气集输管线风险等级的等级标准,并建立了符合实际情况的天然气长输管线、站场设备半定量风险评价指标体系。

赵金洲、喻西崇等人将改进的 BP 神经网络用于给定腐蚀缺陷尺寸下腐蚀程度评价、剩余强度(失效应力)评价、剩余寿命预测以及模糊可靠性预测,预测结果和现场测试数据吻合较好。将模糊数学引入断裂失效概率模型中,分别建立了基于断裂失效判据、基于 FAD 失效评估图、基于剩余强度以及基于正规化模糊遗传神经网络等 4 种断裂失效模型;综合评价了 4 种定量计算确定性可靠度方法,即改进 JC 方法、改进 Monte - Carlo 法、GA - JC 法和 ANN - Monte - Carlo 法。

廖柯熹等人首次利用故障树分析方法,建立了油气管道失效故障树,通过故障树定性与定量分析,确定了管道的薄弱环节、失效概率以及主要影响因素,并将该方法应用于现场管线的失效分析,为相应的生产管理部门制定管线的维护与管理措施提供了科学依据。运用模糊综合评判原理建立了油气管道失效严重度多层次模糊综合评判模型。该模型综合考虑了失效概率、失效损伤程度、系统性能的破坏等因素对管道失效严重度的影响。通过建立的失效严重度影响因素评价表,由专家评分和模糊统计试验得到因素权重系数与模糊评判矩阵。由于较全面地考虑了油气管道失效的影响因素,从而克服了只依靠失效概率进行油气管道失效严重程度评价带来的片面性与局限性。

管道适用性评价技术是近年来发展起来的一项新技术。本书以腐蚀缺陷管道为主线,以我的学生喻西崇博士的博士论文为主体,尽量全面、系统地描述了管道适用性评价技术。管道适用性评价技术就是对含有缺陷的管道是否继续使用以及如何继续使用的定量评价,对含有缺陷的管道的未来发展、管道的检测周期及维修周期等重要参数的定量评价,保证管道安

全和经济运行的必要手段，以现代断裂力学、弹塑性力学和可靠性理论为基础的严密而科学的评价方法。本书所介绍的管道适用性评价技术的内容主要包括：管道失效分析、管道的剩余强度评价、剩余寿命预测、可靠性分析以及风险管理等四大部分。这也是国内第一本涉及这一内容的读物，肯定有许多不完善和错误的地方，我们希望这本书能起到抛砖引玉的作用，我们也相信通过这本书，会有更多的高水平的学者加入到这一研究行列中来，共同推动我国急需的管道适用性评价技术的发展。

感谢所有被引用或参考过的论著的作者！感谢我所有开展这一领域研究的硕士生和博士生！特别感谢何生厚教授的指点和推荐这本书的热心！特别感谢中国石化出版社邓敦夏等同志对这本书的厚爱！



2005年2月26日

目 录

第一章 人工神经网络基础及改进方法	(1)
第一节 标准 BP 人工神经网络和其改进方法	(1)
一、标准 BP 人工神经网络的基本算法	(1)
二、标准 BP 神经网络的缺点	(4)
第二节 标准 BP 神经网络的改进方法	(5)
一、提高收敛速度, 克服“平台效应”	(5)
二、合理改进输入学习训练样本	(6)
三、合理有效地确定网络隐层的节点数	(8)
四、提高 BP 神经网络的泛化能力	(8)
五、利用遗传算法提高全局收敛能力	(10)
六、模糊逻辑和 BP 神经网络结合	(18)
第二章 管道的腐蚀影响分析	(23)
第一节 探寻影响管道腐蚀的主要因素	(23)
一、灰色关联分析方法	(23)
二、二层改进的模糊神经网络方法	(24)
三、应用分析	(24)
第二节 管道内腐蚀的机理分析	(29)
一、注水管道的腐蚀机理分析	(29)
二、油气管道的腐蚀机理分析	(35)
第三节 管线外腐蚀的影响分析	(42)
一、管线外腐蚀的影响因素	(42)
二、环境土壤理化性质检测	(44)
第四节 管道的腐蚀程度评价	(47)
一、管道的腐蚀程度评价方法	(47)
二、油气管道内腐蚀程度评价	(54)
第三章 管道腐蚀缺陷尺寸和腐蚀速率的确定	(57)
第一节 利用腐蚀检测手段确定腐蚀缺陷尺寸的变化趋势	(57)
一、管道外腐蚀检测技术	(58)
二、管道内腐蚀检测技术	(60)

第二节 管道腐蚀缺陷裂纹扩展数学模型的建立	(68)
一、管道裂纹扩展速率的机理	(68)
二、腐蚀和疲劳裂纹扩展的曲线图	(69)
三、腐蚀疲劳裂纹扩展速率的数学模型的建立及求解	(70)
第三节 腐蚀速率变化趋势预测	(71)
一、利用灰色理论 $GM(1, 1)$ 预测管道腐蚀速率的变化趋势	(71)
二、利用改进的模糊神经网络预测腐蚀速率的变化趋势	(79)
第四节 管道腐蚀缺陷尺寸的变化趋势的预测	(81)
第四章 管道的适用性评价技术概述	(83)
一、管道适用性评价的目的	(83)
二、管道适用性评价方法的研究进展	(84)
三、管道适用性评价的意义及技术思路	(85)
四、管道适用性评价方法	(86)
第五章 管道的失效分析	(87)
第一节 管道失效抗力指标	(87)
一、YBB 准则	(87)
二、LBB 准则	(88)
三、不同失效模式时的韧性要求	(89)
第二节 管道失效模式和断裂失效判据的确定	(90)
一、管道失效模式的确定	(90)
二、管道的断裂失效判据	(91)
第三节 管道的失效故障树分析	(95)
一、失效准则	(95)
二、管道失效故障树分析	(95)
第四节 管道失效严重度多层次评价及应用	(104)
一、数学模型的建立	(104)
二、油气管道失效严重度评价	(105)
三、现场应用分析	(106)
四、结论	(108)
第六章 在役管道的剩余强度评价	(109)
第一节 腐蚀缺陷的简化方法	(109)
一、管道中腐蚀缺陷的分类	(110)
二、单条腐蚀缺陷裂纹的简化方法	(110)
三、腐蚀缺陷裂纹群的简化方法	(111)

第二节 在役管道在腐蚀缺陷区域的应力分析·····	(114)
一、利用经验或半经验关系式以及规范简化计算·····	(114)
二、利用随机有限元软件计算·····	(116)
三、利用模糊遗传神经网络和随机有限元软件相结合·····	(116)
第三节 管道的剩余强度和最大工作(失效)压力计算·····	(117)
一、管道应力强度因子的计算·····	(118)
二、管道剩余强度计算方法·····	(120)
三、管道最大允许工作(失效)压力计算·····	(125)
四、管道剩余强度和最大输送压力变化趋势的预测·····	(127)
第四节 管道系统的剩余强度评估·····	(131)
一、管道剩余强度的Ⅰ级评估·····	(131)
二、管道剩余强度的Ⅱ级评估·····	(132)
三、管道剩余强度的Ⅲ级评估·····	(134)
第七章 管道剩余寿命的预测·····	(140)
第一节 管道的临界腐蚀缺陷尺寸的计算·····	(140)
一、CVDA-84 规范·····	(141)
二、J 积分断裂力学方法·····	(141)
第二节 预测管道的剩余寿命随着时间的变化趋势·····	(141)
一、预测给定腐蚀缺陷尺寸下的剩余寿命·····	(141)
二、基于腐蚀缺陷尺寸预测管道剩余寿命的变化趋势·····	(143)
三、基于时间序列预测剩余寿命变化趋势·····	(143)
四、应用分析·····	(144)
第三节 利用概率统计方法预测管线的剩余寿命·····	(145)
一、基本理论与方法·····	(145)
二、管道的剩余寿命预测·····	(146)
第一节 利用改进的遗传神经网络预测管道的剩余寿命·····	(148)
第八章 管道的可靠性分析·····	(150)
第一节 管道可靠性分析的理论基础·····	(150)
一、管道可靠性分析的定义和特点·····	(150)
二、管道可靠性的主要指标·····	(151)
三、管道可靠度的计算理论——应力与强度干涉理论·····	(154)
四、管道的可靠性指标的几何意义·····	(156)
五、可靠性分析中的不确定性因素·····	(158)
第二节 管道模糊可靠度(失效概率)的计算方法·····	(161)
一、管道模糊可靠度(失效概率)的计算模型·····	(161)

二、管道模糊可靠度的计算方法·····	(169)
第九章 管道的风险管理技术 ·····	(192)
第一节 管道的风险管理技术基础 ·····	(192)
一、管道的风险管理技术的内容和实质·····	(192)
二、管道的风险管理技术的回顾·····	(193)
第二节 管道风险评价技术 ·····	(195)
一、定性风险评价方法·····	(196)
二、定量风险评价方法·····	(201)
三、半定量风险评价方法·····	(204)
第三节 管道风险控制、检测和功能监测技术 ·····	(205)
一、管道风险控制技术·····	(205)
二、管道风险监测技术·····	(205)
三、管道风险管理的功能监测技术·····	(208)
四、风险管理的工具·····	(208)
参考文献 ·····	(209)

第一章 人工神经网络基础及改进方法

管道腐蚀的影响因素众多,影响机理复杂,且各影响因素之间又存在相互影响和制约关系,因此很难建立各影响因素和腐蚀管道的腐蚀速率、剩余强度、失效压力、剩余寿命以及可靠性之间精确的数学模型;即使建立了数学模型,计算结果往往误差较大,不能直接应用于现场实际。因此有必要搜寻一种可处理不完全、不精确信息的方法对管道腐蚀影响因素进行评价。人工神经网络具有自组织、自学习、非线性映射功能,因此可采用人工神经网络评价方法对管道腐蚀影响因素进行评价。由于人工神经网络贯穿了全过程,因此将有关人工神经网络方面的基础理论以及改进方法单独作为一章进行重点研究。

第一节 标准 BP 人工神经网络和其改进方法

一、标准 BP 人工神经网络的基本算法

自从 1986 年 Rumelhart 和 McClland 等人提出了适用于多层前向神经网络学习的广义 δ 学习规则——误差反向传播(Error Back Propagation - BP)算法以来, BP 神经网络是当前应用最为广泛、最基本的一种人工神经网络^[1, 2],它的结构简单,工作状态稳定,易于硬件实现,广泛应用于模式识别、非线性映射、复杂系统仿真、时间序列预测、智能控制以及信号处理等方面。

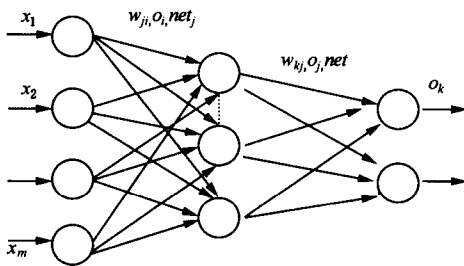


图 1.1 三层 BP 网络结构

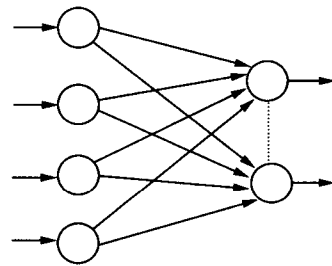


图 1.2 二层 BP 网络结构

最常用的 BP 神经网络结构是三层,即包括输入层、隐含层以及输出层,如图 1.1 所示。只由输入层和输出层组成,无隐含层的神经网络称为二层 BP 神经网络,如图 1.2 所示。标准的 BP 神经网络算法的推导过程如下。

令某一训练输入矢量为 $X_P = (x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pn})^T$, 网络实际输出为 $O_P = (o_{p1}, o_{p2}, \dots, o_{pm})^T$, 对应输入 X_P 的理想输出为 $T_P = (t_{p1}, t_{p2}, \dots, t_{pm})$, 下面推导时针对样本集中一个

样本, 因此省略了符号 P。

输出误差为:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (t_k - o_k)^2 = f(X_P, w_{kj}, w_{ji}) \quad (1.1)$$

由式(1.1)可以看出, 误差函数是输入节点值和网络连接权值的非线性函数。BP 神经网络训练就是通过最速下降法动态地调整连接权值以达到:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} E = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (t_k - o_k)^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} f(X_P, w_{kj}, w_{ji}) = 0 \quad (1.2)$$

1. 计算输出层到隐层神经元的权系数增量的变化 Δw_{kj}

设 k 为输出层中第 k 个神经元, 学习效率 η 不变, 由最速下降法知输出层到隐层神经元的权系数增量的变化表达式为:

$$\Delta w_{kj} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{kj}} \quad (1.3)$$

误差 E 为实际网络输出 o_k 的表达式, 而输出 o_k 又是第 k 个节点所有输入 net_k 的非线性转换:

$$o_k = f(net_k) = f\left(\sum_{j=1}^n w_{kj} o_j - \theta_k\right) \quad (1.4)$$

偏导数 $\frac{\partial E}{\partial w_{kj}}$ 的计算通过复合函数求导法则计算:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{kj}} = \frac{\partial E}{\partial net_k} \cdot \frac{\partial net_k}{\partial w_{kj}} = \frac{\partial E}{\partial net_k} \cdot \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^n w_{kj} o_j - \theta_k\right)}{\partial w_{kj}} = \frac{\partial E}{\partial net_k} \cdot o_j \quad (1.5)$$

令 $\delta_k = -\frac{\partial E}{\partial net_k}$, 则有:

$$\Delta w_{kj} = \eta \delta_k o_j \quad (1.6)$$

$$\text{即 } w_{kj}(N+1) = w_{kj}(N) + \eta \delta_k o_j = w_{kj}(N) - \eta \frac{\partial E}{\partial w_{kj}} \quad (1.7)$$

δ_k 的计算如下:

$$\delta_k = -\frac{\partial E}{\partial net_k} = -\frac{\partial E}{\partial o_k} \frac{\partial o_k}{\partial net_k} \quad (1.8)$$

$$\text{其中, } \frac{\partial E}{\partial o_k} = -(t_k - o_k) \quad (1.9)$$

由 $o_k = f(net_k)$, 故有:

$$\frac{\partial o_k}{\partial net_k} = f'(net_k) \quad (1.10)$$

由式(1.9)和式(1.10)可得:

$$\delta_k = (t_k - o_k) f'(net_k) \quad (1.11)$$

将式(1.10)代入式(1.6)中得到:

$$w_{kj}(N+1) = w_{kj}(N) + \eta(t_k - o_k)f'(net_k)o_j \quad (1.12)$$

如果激励函数为 S 型函数如：

$$o_k = \frac{1.0}{1.0 + \exp(-net_k)} \quad (1.13)$$

则有：

$$f'(net_k) = o_k(1 - o_k) \quad (1.14)$$

将式(1.14)代入式(1.12)得：

$$w_{kj}(N+1) = w_{kj}(N) + \eta(t_k - o_k)o_k(1 - o_k)o_j \quad (1.15)$$

2. 计算隐层神经元到输入层神经元的权系数增量的变化 Δw_{ji}

$$\begin{aligned} \Delta w_{ji} &= -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ji}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial net_j} \cdot \frac{\partial net_j}{\partial w_{ji}} = -\eta \left(\frac{\partial E}{\partial o_j} \cdot \frac{\partial o_j}{\partial net_j} \right) o_i \\ &= -\eta \frac{\partial E}{\partial o_j} \cdot f'(net_j) \cdot o_i = \eta \delta_j o_i \end{aligned} \quad (1.16)$$

然而 $-\frac{\partial E}{\partial o_j}$ 不能直接求导，只能通过隐函数求导，间接求得：

$$-\frac{\partial E}{\partial o_j} = -\sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial E}{\partial net_k} \cdot \frac{\partial net_k}{\partial o_j} \right) = -\sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial E}{\partial net_k} \cdot w_{kj} \right) = \sum_{k=1}^n (\delta_k w_{kj}) \quad (1.17)$$

因此 δ_j 的计算如下：

$$\delta_j = f'(net_j) \sum_{k=1}^n (\delta_k w_{kj}) \quad (1.18)$$

由(1.18)可以看出，隐层到输入层之间的误差 δ_j 由输出层到隐层之间的误差 δ_k 计算得到，即误差是反向传播的。

3. 计算隐层节点 j 和输出节点 k 的阈值变化

$$\theta_k = \eta \times \delta_k, \theta_j = \eta \times \delta_j \quad (1.19)$$

式(1.1)~(1.19)各式中的符号说明：

net_j ——隐层节点 j 的输入；

net_k ——输出层节点 k 的输入；

o_i ——输入层节点 i 的输出，即输入层节点 i 的输入；

o_j ——隐层节点 j 的输出；

o_k ——输出层节点 k 的实际输出；

t_k ——输出层节点 k 的理想输出(教师信号)；

w_{ji} ——从输入层节点 i 到隐层节点 j 的连接权值；

w_{kj} ——从隐层节点 j 到输出层节点 k 的连接权值；

θ_j 、 θ_k ——分别为隐层节点 j 和输出层节点 k 的阈值；

m 、 ii 、 n ——分别为输入层节点数、隐层和输出节点数；

N ——给定样本的迭代次数。

标准 BP 神经网络的程序计算框图如图 1.3 所示。

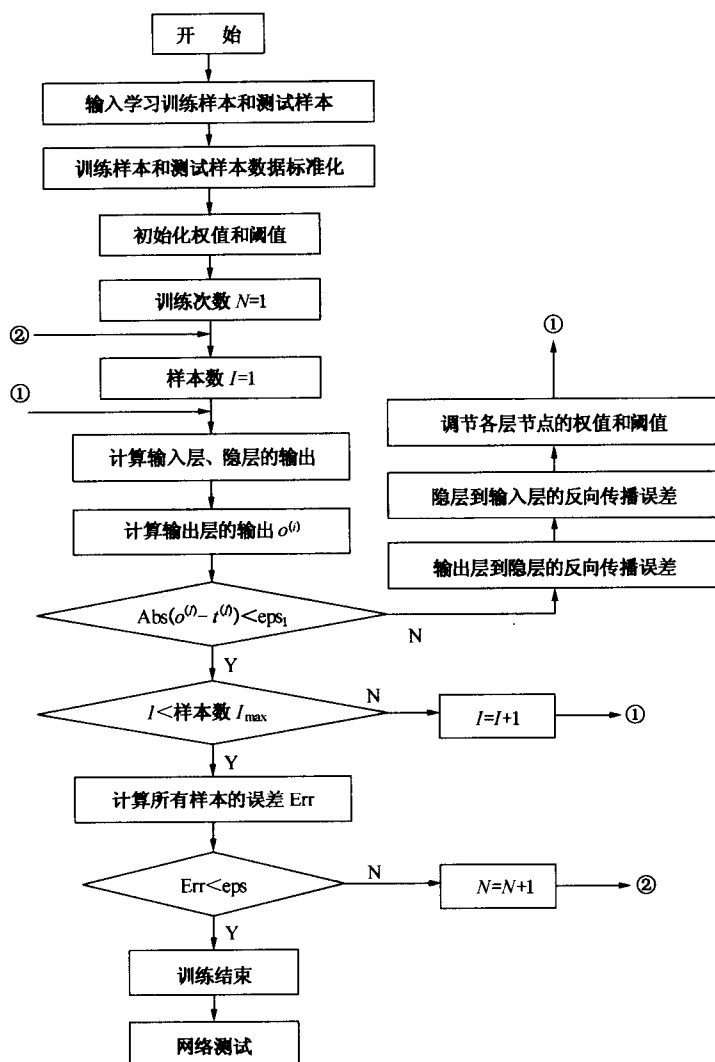


图 1.3 标准 BP 神经网络的程序计算框图

二、标准 BP 神经网络的缺点

传统的 BP 神经网络在理论上不完善和在算法上存在不足。归纳起来 BP 神经网络存在以下几方面缺点：

1. 收敛速度慢，容易出现“平台效应”

BP 神经网络算法的实质是利用最速下降法优化误差函数，从一系列初始权值出发，沿误差曲面进行搜索，直到误差满足指定最小值为止，然而误差曲面上有许多“平台”，斜率极

小,从而使得在网络的学习过程中,权值修正接近于 0,导致算法收敛到极小点需要很长时间。

2. 容易陷入局部极小点

由于 BP 神经网络的误差函数是以网络结构的权值为自变量的多元非线性函数,因此存在多个极小点和一个全局最小点。多个极小点的存在,使得网络训练时极易陷入极小值点,这就是 BP 神经网络的“欺骗性”问题。

3. 泛化能力差

标准的 BP 神经网络的泛化能力是指神经网络训练结束后,测试未知样本的能力,造成泛化能力差的原因主要有两个方面,其一是网络训练精度不够,其二是训练样本的种类和数量不够,造成外推能力差。

4. 无法从理论上确定网络的拓扑结构

无法从理论上确定隐层层数和隐层节点数;如果网络拓扑结构过大,使得训练效率不高,而且还会造成过拟合,致使网络性能脆弱,容错性下降,浮点溢出;而网络拓扑结构太小,可能会造成网络训练效率低、误差大,甚至不收敛的情况。

5. 解释、推理能力差

BP 神经网络具有强大的学习功能,但是通过学习所得的输出结果难于解释和推理,这主要是因为 BP 神经网络是一种非线性映射,不对学习样本进行分析和建模工作,完全是被当作“黑箱”使用,即网络本身的内部状态和运行情况完全是不透明的,造成对预测结果无法解释和推理。

第二节 标准 BP 神经网络的改进方法

针对标准 BP 神经网络的上述缺点提出相应的改进方法:

- (1) 高收敛速度,克服“平台效应”;
- (2) 合理改进输入学习样本;
- (3) 合理有效地确定网络的拓扑结构;
- (4) 提高 BP 神经网络的泛化能力;
- (5) 克服局部收敛的特点,搜寻全局收敛的方法;
- (6) 采用模糊逻辑数学和 BP 神经网络相结合的模糊神经网络。

下面针对上述六点改进措施,详细介绍每种改进措施的方法和原理。

一、提高收敛速度,克服“平台效应”

通常,学习效率较大可以提高学习效率,但可能发生振荡,因此为了使学习效率取值足够大,又不致于发生振荡,Rumelhart 等人对传统的 BP 神经网络增加了动量因子加以改进,改进的权值修正公式如下(以后为了方便仅写出输入层到隐层节点的权值修正公式):

$$\Delta w_{ji}(N+1) = \eta \delta_j o_i + \alpha \Delta w_{ji}(N) \quad (1.20)$$