

粒子群优化 及智能故障诊断

魏秀业 潘宏侠 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

粒子群优化及智能 故障诊断

魏秀业 潘宏侠 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

粒子群优化及智能故障诊断/魏秀业,潘宏侠著. —北京:国防工业出版社,2010.7

ISBN 978-7-118-07021-7

I. ①粒... II. ①魏...②潘... III. ①人工智能—算法理论—应用—机械设备—故障诊断 IV. ①TP18②TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 142632 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京四季青印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 5 $\frac{1}{2}$ 字数 160 千字

2010 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

优化技术是一种以数学为基础,用于求解各种工程问题优化的应用技术。作为一个重要的科学分支,它一直受到人们的广泛重视。并在科学、经济以及工程领域发挥着极为重要的作用。自 20 世纪 80 年代以来,一些新颖的优化算法,如人工神经网络、混沌、遗传算法、进化规划、模拟退火等,通过模拟来揭示某些自然现象或过程而得到了发展。这些算法独特的优点和机制为解决复杂问题提供了新的思路 and 手段,并在诸多领域得到了成功应用。由于其构造的直观性与自然机理,通常被称作智能优化算法。它具有全局的、并行高效的优化性能,鲁棒性、通用性强,无需问题的特殊信息等优点,已广泛应用于计算机科学、运输问题、组合优化、工程优化设计等领域。

粒子群优化算法是基于群体智能原理的优化算法,源于对鸟群觅食过程中的迁徙和聚集的模拟。它收敛速度快,易实现并且仅有少量参数需要调整,因而一经提出就成为智能优化与进化计算领域的一个新的研究热点,现已取得一些研究成果,并在一些领域得到应用,例如已被广泛应用于目标函数优化、神经网络训练、模糊控制系统等许多领域。但目前国内外将其应用于故障诊断较少。

本书是作者结合国家自然科学基金研究项目,对智能优化算法中的粒子群优化算法及其在复杂机械故障诊断中的应用进行深入研究的基础上撰写而成,包括故障特征参数的提取、测点优化及故障的诊断与辨识,同时吸收了国内外许多代表性的研究成果,对拓宽粒子群优化算法的应用领域,完善机械智能故障诊断的理论及方法具有重要的理论意义和实际价值。本书系统地阐述了基于参数策略的粒子群改进算法,以复杂机械中的齿轮箱为研究对象,研究基于粒子群优化的齿轮箱智能故障诊断理论与方法。

全书共6章。第1章绪论,概述粒子群优化算法的背景、研究现状及发展;概述机械故障诊断方法;第2章阐述了粒子群优化算法的基本原理,对其粒子速度进化方程的分析,分析粒子本身的行为和社会行为以及主要控制参数对粒子群优化算法性能的影响;第3章阐述两种基于参数改进策略的粒子群优化算法,即动态加速常数的粒子群优化算法和速度自适应粒子群优化算法,并在测试函数和神经网络中进行了仿真研究;第4章阐述基于粒子群优化的核主元分析的故障特征选择方法,将优化的核主元分析方法应用于齿轮箱典型故障的特征提取中,与线性主元分析比较而言,有更好的故障识别效果;第5章阐述基于粒子群优化的齿轮箱传感器优化配置方法,解决多测点传感器的布置和定位问题;第6章阐述基于改进粒子群优化的智能故障诊断方法,建立基于粒子群优化算法神经网络故障诊断系统,为非线性复杂系统的故障诊断效率和精度以及诊断自动化的提高提供了一种通用的解决方案。最后,本书在附录中给出改进粒子群算法优化函数和应用于故障诊断的源代码,便于读者使用和研究。

本书所涉及研究内容及成果是在潘宏侠教授的悉心指导和建议下完成的,第1章由潘宏侠撰写,第2章至第6章由魏秀业撰写。在此对参加研究的研究生马清峰、庄雷等表示感谢,感谢中北大学故障诊断研究室的同仁们所给予的热情支持与帮助。最后感谢国家自然科学基金项目(50575214、50875247)、山西自然科学基金项目(2007011070, 2009011026-1)对相关研究工作的资助。

本书可作为智能优化及机械故障诊断相关专业的研究人员以及工程技术人员的参考书。

由于时间和水平有限,书中难免出现疏漏和不妥之处,敬请读者指正。

作者

2010年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 群体智能及其特点	2
1.2 粒子群优化算法的现状与发展	3
1.2.1 算法的改进	3
1.2.2 算法的分析	6
1.2.3 粒子群优化算法的应用	6
1.2.4 粒子群优化算法的研究方向	7
1.3 机械故障诊断技术研究概述	8
1.3.1 故障机理研究	9
1.3.2 信号处理技术	9
1.3.3 故障诊断方法	11
1.3.4 基于人工智能的融合技术的诊断方法	12
第 2 章 粒子群优化算法	17
2.1 基本粒子群优化算法	18
2.1.1 算法原理	18
2.1.2 粒子群优化算法收敛性分析	19
2.1.3 粒子群优化算法流程	24
2.1.4 基本粒子群优化算法的社会行为分析	25
2.2 标准粒子群优化算法	26
2.2.1 带惯性权重粒子群优化算法	26
2.2.2 带收缩因子粒子群优化算法	27
2.3 粒子群优化算法的发展	27

2.3.1	自适应粒子群优化算法	28
2.3.2	混合粒子群优化算法	28
2.4	粒子群优化算法参数的设置	30
2.5	粒子群优化算法与遗传算法的比较	32
第3章	基于参数策略的粒子群优化算法改进	35
3.1	动态加速常数的粒子群优化算法	35
3.1.1	算法描述	35
3.1.2	算法在函数中的仿真实验	36
3.1.3	算法在函数中的测试	41
3.1.4	算法在神经网络中的测试	45
3.2	速度自适应的粒子群算法	50
3.2.1	算法描述	50
3.2.2	算法在函数中仿真研究	51
3.2.3	算法在神经网络中的仿真研究	54
3.2.4	算法在神经网络中的测试	57
3.3	主要控制参数的协同关系分析	60
3.3.1	已有研究结果概述	60
3.3.2	参数间的协同关系对算法的性能控制分析	60
第4章	基于粒子群优化的核主元分析特征提取技术	63
4.1	基于主元分析方法的特征提取	64
4.2	基于核主元分析的特征提取技术	66
4.2.1	算法原理	66
4.2.2	算法实现	69
4.3	基于粒子群优化算法的核函数的参数优化	69
4.3.1	核参数优化适应度建立	70
4.3.2	粒子群优化核函数参数的实现	72
4.4	仿真研究	73
4.4.1	构建 Iris 仿真数据集	73

4.4.2	粒子群优化核参数的实现及核主元分析结果	74
4.5	基于粒子群优化的核主元分析故障样本特征提取	77
4.5.1	建立齿轮箱特征参数集	77
4.5.2	基于粒子群优化算法的核参数的优化	79
4.5.3	核主元分析结果及特征参数提取	81
第5章	基于粒子群优化的齿轮箱传感器优化配置	88
5.1	传感器优化布置的研究进展	89
5.1.1	传感器优化问题的数学模型描述	89
5.1.2	传感器优化配置准则	90
5.1.3	传感器优化配置的计算方法	92
5.2	粒子群优化方法在齿轮箱测点优化中的应用	93
5.3	齿轮箱有限元建模与模态计算	94
5.3.1	齿轮箱箱体建模	94
5.3.2	齿轮箱箱体计算模态分析	96
5.4	基于粒子群优化的齿轮箱传感器优化布置的实现	99
5.4.1	初选点方案	99
5.4.2	适应度	104
5.4.3	参数编码	104
5.4.4	粒子群算法优化测点算法的实现过程	104
5.4.5	优化结果及分析	105
5.5	齿轮箱箱体试验模态分析	110
5.5.1	试验分析的设备	110
5.5.2	测点布置及测试方案	110
5.5.3	测点频响特性分析	111
5.5.4	试验模态结果分析	118
第6章	基于粒子群优化神经网络的齿轮箱故障诊断方法	121
6.1	齿轮箱故障机理分析	121
6.1.1	齿轮常见的故障形式及产生的原因	122

6.1.2	轴承常见的故障形式及产生的原因	123
6.2	齿轮箱常见故障的振动特征分析	124
6.2.1	齿轮的故障特征	124
6.2.2	轴承的故障特征	125
6.2.3	轴的故障特征	126
6.3	齿轮箱故障诊断实验方案	126
6.3.1	齿轮箱故障的设置	127
6.3.2	测点的选定	128
6.3.3	齿轮箱信号采集	129
6.4	齿轮箱的故障特征值的选取	130
6.5	粒子群优化神经网络故障诊断算法实现	130
6.5.1	神经网络故障诊断系统的构建	130
6.5.2	粒子群优化神经网络参数的设置	131
6.5.3	神经网络的训练与诊断样本	131
6.5.4	神经网络的理想输出的设置	133
6.5.5	神经网络的训练和诊断结果	134
附录 A	基于粒子群优化算法的函数优化程序	139
附录 B	基于粒子群优化算法的故障诊断源程序	143
参考文献		171

第 1 章 绪 论

20 世纪 90 年代以来,群体智能(Swarm Intelligence)的研究引起了众多学者的极大关注,群体智能是受社会昆虫的启发,通过对其行为的模拟产生的一系列解决传统复杂问题的新方法,它是指众多无智能的简单个体组成的群体通过相互之间的简单合作表现出的智能行为。其中,粒子群优化算法^[1](Particle Swarm Optimization, PSO)是 J. Kennedy 和 R. C. Eberhart 在 1995 年提出的一种基于群体智能原理的优化算法,源于对鸟群觅食过程中的迁徙和聚集的模拟。它收敛速度快,易实现并且仅有少量参数需要调整,因而一经提出就成为智能优化与进化计算领域一个新的研究热点,已经取得一些研究成果,并在一些领域得到应用。目前,被广泛应用于目标函数优化、神经网络训练、模糊控制系统等许多领域。

对复杂机械系统进行状态监测与故障诊断是人们普遍重视和关注的课题,经过三十多年的发展,作为新兴的综合性边缘学科,设备故障诊断技术已初步形成了比较完整的学科体系,涉及机械、信息科学、系统科学、人工智能、计算机技术等许多学科。这些当代前沿学科中的理论和方法必然渗透到诊断技术中来,使得诊断技术几乎能够与这些前沿学科同步发展。故障诊断专家系统、神经网络作为人工智能的重要分支,已得到工程领域的广泛关注和应用。群体智能技术作为一种新的优化技术,是人工智能领域研究的一个新的热点,将其中的粒子群优化算法应用于故障诊断,探索一套基于粒子群优化复杂机械的智能故障诊断理论和方法,从而丰富和发展机械设备诊断学科,拓展群体智能的应用领域。

1.1 群体智能及其特点

人类总是从自然界得到启迪,通过研究或模仿生物结构或行为特征进行发明创造,改变着我们的生活,其中一个重要的部分就是利用生物技术来研究计算问题,现在已经有很多源于生物现象的计算技巧,例如,人工神经网络是简化的大脑模型,遗传算法是模拟基因进化的过程。而粒子群优化算法的诞生则来源于另一种生物—社会系统。更确切地说,是由简单个体组成的群落与环境以及个体之间的互动行为,也可称作“群智能”。

群居个体以集体的力量进行觅食、御敌,单个个体只能完成简单的任务,而由单个个体组成的群体却能完成复杂的任务,这种群体所表现出来的“智能”,就称之为群体智能。而从群居昆虫互相合作进行工作中得到启迪,研究其中的原理,并以此原理来设计新的求解问题的算法被称为群体智能优化算法。这些模拟系统利用局部信息从而可能产生不可预测的群体行为。例如 Craig Reynolds 提出了 Boid (Bird-oid) 模型用以模拟鸟群的运动规律,应用于计算机视觉和计算机辅助设计。目前有两种基于群智能的算法:一种是蚁群算法,它是对蚂蚁群落食物采集过程的模拟,已经成功运用在很多离散优化问题上;另一种是粒子群优化算法,是源于对鸟群觅食过程中的迁徙和聚集的模拟,于 1995 年提出并成功的用于函数优化,后来又进行了有效的拓展。

1) 群体智能优化的基本环节

群体智能优化算法不仅代表了一类群体进化技术,更代表了一种群体搜索机制。其搜索行为由算法的操作和参数决定,而算法的机制大都提炼于生物或社会的行为表现。群体智能优化算法的迭代搜索过程可归纳为社会协作 (social-cooperation)、自我适应 (self-adaptation) 和竞争 (competition) 三个基本环节。其中“社会协作”代表个体在寻优过程中的信息交换和相互学习行为;“自我适应”代表个体主动或被动地调节自身的状态更好地适应环境,在此过程中无需借助其他个体的信息;“竞争”代表种群更新策略,即较好的个体在新种群中获得较大的

生存机会。因此,粒子群优化算法作为群体智能的主要代表,其算法的数学模型的建立就是基于这三个环节的。

2) 群体智能算法的特点

群体智能有以下几方面的特点:

(1) 由于系统中单个个体的能力比较弱,这样每个个体的执行时间比较短,实现起来比较方便,具有简单性。

(2) 单个个体具有改变环境的能力和系统自调节性。

(3) 群体中相互合作的个体是分布的,这样更能够适应当前网络环境下的工作状态。

(4) 没有中心控制或数据源,这样的系统更具有鲁棒性,不会由于某一个或者某几个个体的故障而影响整个问题的求解。

(5) 各个体通过环境的感知(感觉能力)进行合作,个体的增加或减少都可使系统的通信开销非常小,这样的系统更具有可扩充性,同时也具有更好的安全性。

1.2 粒子群优化算法的现状与发展

粒子群优化算法(PSO)作为一种通过对自然界中生物捕食现象的模拟而提出的群体智能算法,采用基于种群的全局搜索策略和简单的速度一位移模式,避免了复杂的遗传操作。由于它的计算速度快以及算法本身的易实现性,引起了国际上众多学者的广泛关注和研究。就其研究内容而言大致可以分为算法的改进、算法的分析及算法的应用。

1.2.1 算法的改进

1) 增加惯性权重和收敛因子

由于不同问题对算法全局或局部搜索能力有不同要求,所以,算法全局搜索能力和局部搜索能力之间的平衡关系最好可以调整。在 PSO 的改进方面,首先是由 Kennedy 和 Eberhart 在 1997 年提出的二进制 PSO^[2],为 PSO 与遗传算法(CA)的性能比较提供了一个有用的方式;为了提高算法的收敛性能,Shi 和 Eberhart^[3]于 1998 年对 PSO

的速度项引入了惯性权重 ω , 并提出了在进化过程中动态调整惯性权重以平衡收敛的全局性和收敛速度, 该进化方程已经被相关学者称之为标准 PSO。Clerc^[4] 于 1999 年在进化方程中引入收缩因子以保证算法的收敛性, 同时使得速度的限制放松。

在国内, 李宁等^[5] 提出了带变异算子的粒子群优化算法。该算法摆脱后期易于陷入局部极优点的束缚, 同时又保持前期搜索速度快的特性, 增强了全局搜索能力, 搜索成功率得到大大提高。高鹰等^[6] 把免疫系统的免疫信息处理机制引入到粒子群优化算法中, 给出了免疫粒子群优化算法, 改善了粒子群优化算法摆脱局部极值点的能力, 提高了算法进化过程中的收敛速度和精度。延丽平等^[7] 提出自适应随机惯性权重的 PSO, 采用 $(0, 1)$ 均匀分布的随机惯性权重来取代线性递减的方式, 将算法应用于分类问题, 通过实验验证该算法比标准的 PSO 收敛速度快, 并具有更好的收敛精度。

2) 对微粒的特征量重新赋值

微粒的特征量包括微粒的位置 $x_{id}(t)$ 和速度 $v_{id}(t)$ 。为了避免 PSO 早熟收敛和停滞现象, 研究者指出可依据一定标准为整个群体或某些微粒的状态量重新赋值, 以维持群体多样性, 使算法可持续进化。

Xie Xiao-feng^[8] 给出的自适应微粒群优化算法, 是用一种新微粒替换不活泼微粒来保持群体多样性, 如果非全局最优微粒与全局最优微粒之间适应度差值的绝对值连续小于事先定义的临界常数的次数达到一定值, 则该非全局最优微粒就被视为不活泼的微粒, 并会被一种新的微粒替换。Xie Xiao-feng 等人^[9] 将自然进化过程中的群体灭绝现象引入 PSO, 该混合算法在微粒位置和速度更新之后, 按一个预先定义的灭绝间隔重新初始化所有微粒的速度, 实验表明群体灭绝机制可改善微粒群算法的性能, 但混合算法会受灭绝间隔的影响。为此可考虑使用自适应调整间隔的方法。Thiemo Knnk 等人^[10] 提出一种带空间微粒扩展的微粒群优化算法 (SEPSO), 尝试在微粒开始聚集时增加群体多样性。

3) 改进粒子的位置和速度

除了前述的 Shi 在 PSO 中引入惯性权重因子和 Clerc 等人在

PSO 速度更新公式中引入收缩因子外, I. R. Al-Kazem 等人^[11]提出的一种多阶段 PSO 算法 (Multi-phase Particle Swarm Optimization, MPSO), 其主要思路是将微粒群分组, 并让群体在算法不同阶段有不同的暂态搜索目标, 这些目标使微粒移离或移向迄今为止自身或全局的最好位置, 可防止微粒陷入局部最优解。Frans van den Bergh^[12]提出一种保证收敛的微粒群优化算法 (GCP SO)。该算法为目前找到的全局最好微粒引入新的速度和位置更新公式, 并在新的速度和位置更新公式中引入一个比例因子, 如果算法连续成功地找到全局最好微粒, 则增大比例因子值; 如果算法连续失败的次数达到一定值, 则减小比例因子值; 如果连续成功或失败的次数未达到指定阈值, 就保持比例因子值不变。比例因子项的加入使得算法可在围绕全局最优位置的一个区域内进行随机搜索, 搜索区域大小由参数比例因子值决定。2002 年, Frans van den Bergh 等^[13]给出了 GCP SO 保证收敛到局部最优值的证明, 但是无论 GCP SO 还是 PSO 均不能保证一定会收敛到全局最优值。He 等^[14]在 PSO 算法速度更新公式中, 通过引入被动聚集 (Passive Congregation) 项, 实现种群内的信息充分共享, 防止了粒子因缺乏足够的信息而出现判断失误进而导致陷入局部极小, 但附加项的加入降低了算法的收敛速度。A. Ratnaweera 等^[15]通过引入时变加速因子和时变惯性权重因子, 有效地增强了算法的局部搜索能力, 提高了算法的收敛速度。

4) 多种群 PSO

Frans van den Bergh 等人^[16]提出一种协同微粒群优化算法 (Cooperative Particle Swarm Optimizers, CP SO)。该算法是对带惯性权重的 PSO 的一种修正。由 CP SO 优化的每一个向量被分割为多个群体, 每个群体在其他群体帮助下最优化向量不相关联的部分。用该算法训练单元神经网络, 实验表明当使用恰当的群体数 (恰当的划分因子 K) 时, CP SO 的性能优于带惯性权重的 PSO 算法。多种群算法的缺点是算法初期的搜索效率低于标准算法, 同时多个子群的引入加大了算法的计算量。

Kennedy 等人^[17]根据多种群的思想, 提出使用簇分析法改进

PSO,该算法首先将整个微粒群划分为几个簇,并确定每个簇的中心,然后用个体 i 的簇中心代替个体经历过的最优位置,或用目前找到的最优个体的簇中心代替群体经历过的最优位置,并以此来进行粒子速度和位置的更新。

5) 混合方法

Katare 等^[18]提出了一种基于 PSO 和 Levenberg-Marquardt 的混合优化方法,该方法有机地将 PSO 的全局搜索能力与 Levenberg-Marquardt 的局部改良能力相结合,提高了 PSO 的搜索精度;Fan 等人^[19]将 Nelder-Mead simplex 与 PSO 相结合,提高了单纯形方法的收敛速度,同时提高了 PSO 的搜索精度;Victoire 等人^[20]将 PSO 与序贯二次规划 SQP 相结合,同时利用 PSO 的并行全局搜索能力与 SQP 的局部改良能力,克服了 SQP 需要依赖问题梯度信息的缺点,有效地解决了电力系统大规模的经济调度问题。另外,Sun 等人^[21]将量子行为引入 PSO 算法,利用量子测不准原理代替牛顿力学来确定微粒的行为^[22]。

1.2.2 算法的分析

在粒子群优化算法的行为分析和收敛分析方面,Frans van den Bergh 引用 Solis 和 Wets 关于随机性算法的收敛准则^[23],证明了收敛的 PSO 收敛于局部最优解,而不能保证收敛于全局最优解。张丽平^[24]研究了 PSO 的收敛条件,导出了 PSO 收敛的惯性权重和学习因子的关系式,并且对 PSO 的参数取值进行了探讨,着重分析了惯性权重、种群大小、收缩因子、最大速度限制等参数对 PSO 性能的影响。李博^[25]以简化的 PSO 作为基本模型,分析得到粒子进入平衡态前的三种形态,并给出了相应的参数选择区域。通过试验现象对基本 PSO 的收敛性进行分析,并解释了过早收敛现象的产生原因。最后,给出了基本 PSO 的收敛性证明,并得出 PSO 是收敛的,基本粒子群算法无法保证收敛到全局或局部最优解,它只能最终收敛到当前的种群最优解。

1.2.3 粒子群优化算法的应用

在 PSO 的应用方面,PSO 最早应用于人工神经网络的训练方法,

Kennedy 和 Eberhart 成功地应用于分类 XOR 问题的神经网络训练。在随后的应用中, PSO 又可以用来确定神经网络的结构。作为演化神经网络的例子, Eberhart 等人已经成功用 PSO 来分析人类的帕金森综合症等颤抖类疾病; Parsopoulos 等人将 PSO 用于解决多目标优化问题、最小最大化问题、整数规划问题和定位所有全局极值等问题^[23]。鉴于 PSO 的通用性和有效性, 近几年用 PSO 解决实际问题已成为一个热点。相关文献显示在化工、电力、机械设计、通信等领域都有应用, 例如, Ourique^[26]使用 PSO 来估计在化工动态模型中产生不动态现象的参数区域, 仿真结果显示 PSO 提高了传统动态分叉分析的速度; Abido^[27]利用 PSO 解决考虑电压安全的无功功率和电压控制问题; Jeon 等人^[28]利用 PSO 对降噪结构进行了优化设计; Zhang^[29]等人将 PSO 用于通信系统的 PMD 补偿问题。

国内对 PSO 应用的研究处于起步阶段, 张利彪等人^[30]提出了一种基于粒子群算法求解多目标优化问题的算法, 实现了对多目标优化问题的非劣最优解集的搜索。刘钊等人^[31]设计了一种基于 PSO 的振动信号的自适应滤波模型, 该滤波模型在计算机仿真测试中, 获得了很高的效率和良好的结果。高海兵等人^[32]利用粒子群优化开展神经网络训练算法研究, 加快了训练收敛的速度。李炳宇等人^[33]研究了 PSO 算法在工程优化问题中的应用, 提出了具有简单、高效和普适性特点的基于 PSO 的一种混合算法, 不要求目标函数和约束可微, 以较大的概率求得全局最优解。胡家声等人^[34]提出了一种新的混合粒子群优化算法(HPSO), 将松弛后的离散变量与连续变量并行优化, 算法中引入启发式变异过程, 解决了多时段机组组合问题。柯晶等人^[35, 36]应用 PSO 技术分别对非线性系统和时变系统进行了辨识, 仿真结果表明了对两种系统辨识的可行性。

1.2.4 粒子群优化算法的研究方向

根据国内外关于粒子群优化算法研究的相关文献及进化算法领域的发展趋势分析, 目前主要有几个研究方向^[37]。

1) PSO 的设计及改进研究

应该注重高效的 PSO 的开发,提出合理的核心更新公式以及有效的均衡全局搜索和局部改进的策略。考虑到特定问题的特殊性,应该注重高效混合 PSO 的设计,包括 PSO 与问题的信息或规则、PSO 与神经网络、模糊逻辑、进化算法、模拟退火、禁忌搜索、生物智能以及混沌等方法或策略的结合,充分吸收其他进化算法的优势,以改进 PSO 存在的弊端。此外,鉴于 PSO 对参数的依赖性,提出合理选取参数的指导性方法或结论同样值得重视。

2) PSO 的理论分析

到目前为止,PSO 的分析方法还很不系统,存在许多不完善和未涉及到的问题。如何利用有效的数学工具对 PSO 的运行行为、收敛性、收敛速度、参数选取、参数鲁棒性及计算复杂性进行分析应是目前的研究热点,包括多目标、约束、离散和动态环境下 PSO 的相关理论研究。

3) PSO 与其他进化算法的比较研究

目前研究的进化算法主要有三种典型的算法,遗传算法(Genetic Algorithm,GA),进化规划(Evolutionary Programming, EP)和进化策略(Evolutionary Strategies, ES),这些算法有共同的特点,各自具有各自的优势,把它们与 PSO 相比较,可以突出 PSO 的优劣^[38]。

4) PSO 的应用

算法研究的目的是应用,如何将 PSO 应用于更多的领域,同时研究应用中存在的问题也是值得关注的热点。

1.3 机械故障诊断技术研究概述

故障诊断是一种了解和掌握设备在使用过程中的技术原理,确定其整体或局部是否正常,早期发现故障及其原因并能预报故障发展趋势的技术。它是以可靠性理论、信息论、控制论为理论基础,以现代测试仪器和计算机为技术手段,结合各种诊断对象(系统、设备、机器、装置、工艺、过程等)的特殊规律逐步形成的一门新技术。近 30 年来,机