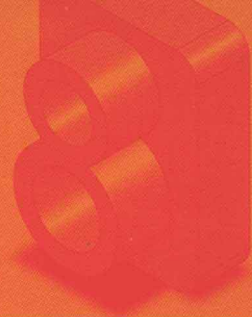
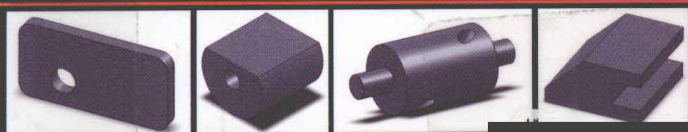


JIYU YICHUAN SUANFA DE
JIXIE LINGJIAN
XINGWEI WUCHA PINGDING



基于遗传算法的 机械零件 形位误差评定

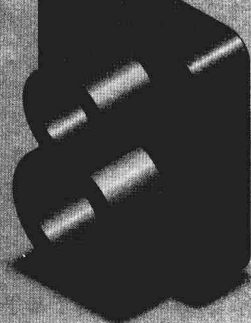


◎ 廖 平 王建录 著



化学工业出版社

JIYU YICHUAN SUANFA DE
JIXIE LINGJIAN
XINGWEI WUCHA PINGDING



基于遗传算法的 机械零件 形位误差评定



◎ 廖 平 王建录 著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书系统地建立了形位误差的评定数学模型,研究了基于遗传算法的形位误差评定方法,并对传统遗传算法进行了改进,提出了归一化实数编码遗传算法,给出了基于遗传算法的各种形位误差评定方法的具体实现步骤,最后结合燃气轮机的特点,进行了基于 NURBS 曲面转子叶片的叶面外形重构研究,分别提出了转子叶片的叶面形状误差评定、叶片的制造位置度误差评定、转子叶片的安装位置度误差评定方法。

本书可作为高等院校机械类专业高年级学生或研究生的教材和参考书,也可供从事机械设计、制造工艺、计量测试和智能算法研究和应用的科技人员和工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

基于遗传算法的机械零件形位误差评定/廖平,王建录著.
北京:化学工业出版社,2011.12
ISBN 978-7-122-12819-5

I. 基… II. ①廖…②王… III. 遗传-算法-应用-形位偏差测量 IV. TG83

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 237389 号

责任编辑:郑宇印
责任校对:王素芹

装帧设计:韩 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 刷:北京市振南印刷有限责任公司
装 订:三河市宇新装订厂
710mm×1000mm 1/16 印张13¼ 字数257千字 2012年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:49.00 元

版权所有 违者必究

前言

Preface

随着现代制造技术的飞速发展,对机械产品的质量要求越来越高,促使人们对机械零件几何要素的形状误差越来越重视,准确测得零件的形状误差一直是国内外同行普遍关注的问题。我国国家技术监督局于1996年发布,1997年实施形状和位置公差新的国家标准,并且与形状误差的ISO标准相符合。形状误差的国家标准和国际标准给出的只是一种几何定义,并没有给出误差最小区域解的判定方法。

最小条件计算形位误差是国家标准和国际标准的基本原则,所获得评定结果具有唯一性,可最大限度地确保被测产品合格,避免不必要的损失。但是,由于形位误差按最小条件评定,其本质是一个复杂非线性最优化问题,运用传统的方法难以直接求解。现有的形位误差测量数据的评定方法大多得到的是一些近似值,有时还会产生较大的误差,在误差评定的过程中会产生争议。如最小二乘法仅提供形状误差的近似评价结果,并不能保证解的最小区域性。究其原因,是这些计算方法在形状误差数学模型和处理方法方面不符合形状误差最小条件的定义,而且不同的测量方法所得到的结论不一致,在某些场合下可能会引起争议。

如何快速准确地计算形状误差已日益显得非常重要,遗传算法在处理这类复杂的非线性优化问题时具有独到之处,随着人们研究的不断深入和计算机技术的不断提高,为有效评定形位误差提供了一种新的途径。

20世纪60年代初,美国Michigan大学的John Holland教授开始研究自然和人工系统的自适应行为,在从事如何建立能学习的机器研究过程中,受达尔文进化论的启发,逐渐意识到为获得一个好的算法仅靠单个策略建立和改进是不够的,还要依赖于一个包含许多候选策略的群体的繁殖,从而提出了遗传算法的基本思想。

基于二进制编码的遗传算法的特点是遗传操作简单,但对于实数空间的寻优,存在人为地将连续空间离散化,从而导致计算精度与编码长度、计算工作量之间的矛盾。为此,开展实数编码遗传算法的理论研究具有重要的理论意义和工程应用价值。

本书是作者长期从事智能算法、形位误差评定理论与方法研究所取得成果的一个总结,主要内容如下。

1. 实数编码遗传算法的理论研究

提出了基于归一化实数编码的遗传算法;给出了复制算子、交叉算子、变异

算子的选取和适应度函数的定义；对基于归一化实数编码遗传算法的模式定理进行了分析；研究了一维和多维归一化实数编码长度与优化精度的关系；用马尔可夫链分析了归一化实数编码遗传算法的收敛性；探讨了归一化实数编码遗传算法的计算效率和性能；针对多维寻优问题，提出了基于归一化实数编码多维并行遗传算法。

2. 基于归一化实数编码遗传算法的函数优化

应用归一化实数编码遗传算法研究函数优化问题，对控制参数、遗传算子和适应度函数的选择进行了探讨，并对其收敛速度进行了分析；结合惩罚函数法和模拟退火法来实现求解约束优化问题；通过一系列典型函数对其性能进行测试，证明采用归一化实数编码遗传算法求解函数优化问题可获得最优解。

3. 基于遗传算法的基本几何形状误差的评定

按照最小区域法的评定准则，分别建立了描述圆度误差、平面直线度误差、空间直线度误差、平面度误差、圆柱度误差、圆锥度误差、球度误差和椭球度误差的数学模型，采用基于归一化实数编码遗传算法的研究成果，精确计算基本几何形体的形状误差。

4. 基于遗传算法的基本几何位置度误差的评定

按照最小区域法的评定准则，分别建立了描述平行度误差、垂直度误差、同轴度误差、倾斜度误差、对称度误差、位置度误差、圆跳动误差、全跳动误差的数学模型，采用基于归一化实数编码遗传算法的研究成果，精确计算基本几何形体的位置度误差。

5. 基于遗传算法的平面曲线形状误差计算

建立了基于智能算法的平面参数曲线形状误差数学模型，借助 NURBS 样条函数建立了适合遗传算法计算的复杂平面曲线形状误差数学模型，采用归一化实数编码多维并行遗传算法进行求解，获得了满足最小区域法的平面曲线形状误差的解。

6. 基于遗传算法的复杂几何形体形状误差计算

按照最小区域法评定准则，建立了基于智能算法的参数曲面形状误差数学模型，借助 NURBS 曲面建立了复杂曲面形状误差数学模型，采用归一化实数编码多维并行遗传算法进行求解，所获得的结果符合最小区域法的评定原则。

7. 形位误差评定在燃气轮机制造中的应用

应用基于智能算法的形位误差评定的研究成果，结合燃气轮机的特点，基于 NURBS 曲面进行了转子叶片的叶面外形重构，分别提出了转子叶片的叶面截面形状误差评定、转子叶片的叶面形状误差评定、叶片的制造位置度误差评定、转子叶片的安装位置度误差评定方法。

本书的撰写和相关研究工作得到了中国工程院院士钟掘教授、西安交通大学虞烈教授、西安交通大学“973”项目首席科学家王铁军教授以及东方电气集团东方汽轮机有限公司的关心和支持，借此机会表示由衷的敬意与感激。

本书得到了国家重点基础研究发展计划（973 计划）“大型动力装备制造基础研究”项目（编号：2007CB707700）和“高性能复杂制造”国家重点实验室资助，高晓毅和戴能云在相关研究中也做了大量工作。在出版过程中，东方汽轮机有限公司的刘学云高级工程师给予了大力的帮助，在此一并表示衷心的感谢。

著者

2011 年 10 月

目 录

Contents

第 1 章 综述	1
1.1 形位误差检测的发展历史背景	1
1.2 基本几何形体形位误差计算的研究现状	1
1.3 复杂几何形体形位误差计算的研究现状	5
1.4 遗传算法产生背景	6
1.5 遗传算法的研究现状	7
第 2 章 基于归一化实数编码遗传算法的研究	16
2.1 概述	16
2.2 归一化实数编码遗传算法的模式定理的研究	16
2.3 确定归一化实数编码长度	19
2.4 归一化实数编码遗传算法种群规模的确定	20
2.5 归一化实数编码遗传算法的种群均匀初始化	21
2.6 归一化实数编码遗传算法的选择算子	22
2.7 归一化实数编码遗传算法的交叉算子	23
2.8 归一化实数编码遗传算法的变异算子	25
2.9 归一化实数编码遗传算法的适应度函数	26
2.10 交叉、变异概率的自适应调整	29
2.11 归一化实数编码遗传算法收敛性的马尔柯夫链分析	29
2.12 归一化实数编码多维并行遗传算法	33
第 3 章 归一化实数编码遗传算法在函数优化中的应用	37
3.1 概述	37
3.2 基于归一化实数编码遗传算法的无约束函数优化	38
3.3 基于归一化实数编码遗传算法的约束函数优化	49
3.4 归一化实数编码多维并行遗传算法性能测试	55
第 4 章 基于遗传算法的基本几何形状误差计算	56
4.1 概述	56

4.2	测点到直线的最小距离	57
4.3	圆度误差计算	58
4.4	直线度误差计算	60
4.5	平面度误差计算	66
4.6	圆柱度误差计算	68
4.7	球度误差计算	71
4.8	圆锥度误差计算	74
4.9	椭球度误差计算	79

第5章 基于遗传算法的位置误差计算 86

5.1	概述	86
5.2	基准的理想要素建立	86
5.3	平行度误差评定	101
5.4	垂直度误差评定	113
5.5	倾斜度误差评定	126
5.6	同轴度误差评定	140
5.7	对称度误差评定	142
5.8	位置度误差评定	144
5.9	圆跳动误差评定	151
5.10	全跳动误差评定	155

第6章 基于遗传算法的复杂平面曲线形状误差计算 158

6.1	平面曲线形状误差的定义	158
6.2	测点的二维坐标变换	158
6.3	测点到理论曲线轮廓最小距离的计算	159
6.4	平面参数曲线形状误差计算	161
6.5	复杂平面曲线形状误差计算	164

第7章 基于遗传算法的曲面形状误差计算 168

7.1	概述	168
7.2	曲面形状误差的定义与数学模型	169
7.3	基于分割逼近法的测点到曲面最小距离的计算	170
7.4	复杂曲面形状误差计算	173

第 8 章	形位误差评定在燃气轮机制造中的应用	176
8.1	燃气轮机透平叶片测量数据预处理	176
8.2	燃气轮机叶片的叶面外形重构	178
8.3	基于实测点的燃气轮机透平叶片重构模型的光顺	182
8.4	实测基准点与理论基准点最佳匹配	188
8.5	燃气轮机叶片的叶面截面形状误差评定	192
8.6	燃气轮机转子叶片的叶面形状误差评定	193
8.7	燃气轮机叶片的制造位置度误差评定	193
8.8	燃气轮机转子叶片的安装位置度误差评定	198
	参考文献	201

第 1 章

综 述

1.1 形位误差检测的发展历史背景

早在工业化发展初期,人们就注意到了形状误差对机械零件质量的影响。在工业生产比较落后的时代,加工相互配合的零件采用的是配作方式,显然,这样加工出的零件不能互换,生产效率比较低。为了解决这一问题,19 世纪中期开始采用通过规和不通过规,以后又在此基础上将零件的加工尺寸规定在最大极限尺寸和最小极限尺寸之间,解决了装配零件的互换性问题,从而提高了制造精度和生产效率。但是这种方法是采用收紧尺寸公差的方法来满足形状精度要求,使得制造工艺复杂,制造成本昂贵,同时对操作工人的技术水平也要求较高。

随着科学技术不断发展,机器设备能保证被加工的零件达到一定的形状精度要求,因而提出了相对放松尺寸公差,并给定形状公差以保证零件精度的方法,从而达到经济的、合理的生产,为此,形状公差和误差的研究和标准化工作逐渐提上了日程。1950 年,美国、英国和加拿大召开三国标准化联席会议,讨论和通过了在图样上的形状公差统一标注法。同年美国军用标准 MIL-STD-8 第一次提出了框格标注法以供使用,给出了一系列符号,为以后的国际标注打下了基础。此后,一些发达国家相继发布了有关形状公差的标准。1953 年英国发布了国家标准 BS 308—1953,1954 年加拿大发布了国家标准 CSA D78.1—1954,1957 年美国发布了国家标准 ASAY 14.5—1957。1958 年国际标准化组织 ISO 提出了关于形状公差框格注法的标准推荐草案,其后又相继颁布了有关形状公差的标准 ISO-1101。

ISO 形状公差标准的制订促进和推动了各国形状公差的研究和标准化工作,各国纷纷修订本国标准,以求与国际标准一致。随着形状公差研究的不断深入,人们已从图样上标注的研究发展到检测方案、误差的计算准则和方法的研究。

1.2 基本几何形体形位误差计算的研究现状

形位误差对机械零件的质量具有重要的影响,随着现代工业的飞速发展,对机械产品的质量要求越来越高,促使人们对机械零件几何要素的形状误差越来越

重视,并制订了相应的计算准则,因此,准确测得零件的形状误差一直是国内外同行普遍关注的问题。我国国家技术监督局于1996年发布,1997年实施形状和位置公差新的国家标准,并且与形状误差的ISO标准相符合。形状误差的国家标准和国际标准给出的只是一种几何定义,并没有给出误差最小区域解的判定方法。为此,人们进行了大量的研究。

机械零件的几何要素大部分为基本几何形体,因此,对基本几何形体形状误差的计算方法的研究最为广泛和深入。

1.2.1 平面度误差计算

平面度误差是计算机床导轨、工作台及各种平板等机械零件表面精度的重要指标。平面度误差常用的计算方法有:最小条件、最小二乘法、对角线平面法和三远点平面法。其中,最小二乘法、对角线平面法和三远点平面法是近似的计算方法,只有最小条件符合实际情况,准确反映了被测平面的形状误差,所计算的误差值最小且唯一,有利于最大限度地保证产品合格。为此,学术界致力于按照最小条件计算平面度误差的研究,先后出现了许多新的算法,如坐标旋转法、非线性优化逼近方法、二维的最优化算法、有序判别法、迭代逼近法等,并且在实际测量中得到应用。

1.2.2 直线度误差计算

直线度误差是指实际直线对其理想直线的变动量。计算直线度误差最小条件原则是指包络被测实体的区域最小。直线度误差可分为给定平面内的直线度误差、给定方向内的直线度误差以及空间直线度误差。在给定平面内的直线度误差值,一般采用最小条件或两端点直线法来进行计算。两端点直线法计算简单,易于实现,但由于采用误差曲线首末两端点的连线为理想直线,以误差曲线对该理想直线的最大正偏差与最大负偏差之差作为直线度误差,因此,理想直线首末端点的坐标值对误差值计算影响极大,并且不是最小值,所以得出的直线度误差与最小条件相比有较大的误差。

目前,给定平面内的直线度误差和给定方向的直线度误差计算已较为成熟,而对于空间直线度误差,研究仍处于探索阶段。有的学者提出用最小平行六面体包络的方法计算空间直线度误差。但由于空间直线的误差值分布在垂直于基准线的各个方向上,而最小平行六面体包络方法只允许误差分布在垂直和水平两个方向上,它不能保证被限制的误差在各个方向具有相同的值,所以该方法只能提供误差计算的近似值。实际上,大多数直线是空间直线,计算直线度误差应在三维空间进行分析。在ISO-1101中,空间直线度被定义为“包容被测轮廓的最小圆柱直径”。根据形状误差的定义,空间直线度误差应采用最小外包络圆柱直径来

表示。目前,在空间直线度误差计算中存在以下问题:(a)如何按照 ISO-1101 定义来计算空间直线度误差;(b)如何根据测量结果对被测空间直线度误差进行计算和结果验证。

1.2.3 圆度误差计算

圆度误差是衡量圆形零件形状精确度的重要指标之一。圆度误差的测量与计算也备受各国学者及广大工程技术人员关注。

圆度误差的计算方法有 4 种:最小条件、最小外接圆法、最大内切圆法和最小二乘法。按最小条件来计算圆度误差是一个非线性优化问题,故该优化问题通常用传统的优化算法来计算,如坐标轮换法、powell 法和阻尼最小二乘法等,而这类算法针对具体问题时,在确定初始设计点、阻尼系数及寻优方向和步长方面具有盲目性,迭代运算次数较多,计算精度得不到保证。圆度误差最小条件计算的数学模型属于不可微复杂优化问题。对这类问题的处理方法,有的学者在一定的条件下将其简化为线性极小化问题计算。有的学者提出了搜寻测点到圆周的最大距离为最小时的圆心和半径的逼近法,并且在运算过程中采用启发式算法以改进计算效率,或采用计算几何方法、神经网络技术来计算圆度误差,但其计算结果并不完全满足最小条件准则。由于模型转换的误差,计算精度受到限制,当不满足“小偏差”或“小误差”条件时,其误差将更大。

1.2.4 圆柱度误差计算

在几何量测量中,圆柱度的测量是一种很常见的测量项目。一般生产中常用圆度公差和素线(或轴线)的直线度公差来控制圆柱度误差或是用径向跳动公差来控制圆柱度误差。这两种控制方法都不能实际测量和计算出圆柱度误差的大小。

圆柱度测量最常用、最有效的方法就是坐标测量法。虽然坐标测量法的数据处理有一些比较有效的方法,但是这些方法都有一定的局限性和模型误差。它们大都是在“小偏差假设”和“小误差假设”的前提下进行的。在建立数学模型过程中,使用微分法把非线性问题线性化,或将圆柱度误差的非线性问题映射成平面度问题计算,由此带来一定的模型误差,从而使坐标测量法的使用受到限制,不易获得较高的精度。

1.2.5 球度误差计算

球体在精密机械、仪器仪表等领域中应用越来越广泛,其加工精度要求越来越高。因此球度误差的计算研究受到人们的重视。球度误差是指球面形状误差。

球度公差带是半径差为公差值 t 的两同心球面之间的区域, 球度误差是指实际被测球对其理想球的变动量, 理想球的位置应符合最小条件。在球度误差计算方面, 国内外学者相继提出了最小二乘法、最大内接球法、最小外接球法、最小半径法和最小条件, 对球度误差的判别准则、计算方法进行了研究。

1.2.6 圆锥度误差计算

圆锥配合由于具有对中性好、间隙和过盈可以调整以及密封性好的特点, 因而在机械产品中应用较广。但是圆锥几何形状误差的计算涉及的变量维数较高, 而且数学模型难以线性化。一般圆锥的形状要借助直线度公差和圆度公差来保证, 或者采用圆锥塞规、测角仪等检验圆锥零件的合格性, 这些方法虽然简单, 但不能精确地反映圆锥的整体形貌, 因此具有一定的局限性。随着三坐标测量机的广泛应用, 使得圆锥零件的形状误差高精度测量成为可能, 分别出现了最小二乘法、最小条件、最佳内接圆锥法及最佳外接圆锥法等计算方法, 但目前实际应用较少。

1.2.7 形状误差的包容统一判别准则的研究

形状误差的包容统一判别准则及有效算法的研究在理论和实践中都具有重要的意义。对这类问题的研究, 目前主要是在一定的条件下将形状误差计算的非线性模型转化为线性模型, 然后利用凸分析理论或线性规划理论来建立判别准则和给出相应的计算方法。但是, 在实际计算问题中, 将非线性模型转化为线性模型时产生的模型误差有时是不可忽略的。另外, 对于开发研制新型高精密度测量仪器, 实现计算机辅助测量, 更有必要对非线性模型的统一判别准则及有效的统一算法进行研究。胡新生利用不可微优化理论, 建立了非线性模型双包容和单包容的统一判别准则。然后, 利用极大熵数构造了无约束可微优化列来逼近无约束不可微优化问题, 使计算问题的计算能使用现有的标准无约束优化算法软件来计算。Murthy 提出了单纯性搜索和螺旋搜索法来计算形状误差, 将形状误差的非线性问题转化为线性问题进行求解; Hong 提出的边缘多项式法寻找包含最小区域的封闭多项式; 夏新涛采用最小向量范数来计算形状误差, 根据国家标准的公差定义给出了向量范数最小化原理计算形状误差的数学模型, 但其结果是否符合最小条件的评价, 没有给出令人满意的结论。刘健将线性鞍点规划与形状误差的最小区域计算相结合, 将形状误差的计算模型略去高次项而得到线性模型再进行线性规划计算, 这样势必带来所谓“少许模型误差 e ”, 放大了数据处理的结果误差。另外, 一些学者基于小偏差和小误差的假定, 采用置换算法、单纯形法、有效集法进行计算, 很好地解决了一些简单轮廓的形状误差计算问题, 但形状误差的包容统一判别准则目前还未形成完整的理论体系。

近年来,一些学者运用计算几何来计算满足最小条件的形状误差。但是,这些计算结果要依赖于被测轮廓测点的设置,由于测量的不确定性,对同一被测轮廓每一次测量所得到的结果都不一样,为此,一些研究者对被测轮廓采样的不确定性进行了广泛的研究。他们将被测轮廓的尺寸和形状、采样策略、测点的数量和测量技术这些因素进行综合考虑,其研究结果表明,测点的数量对测量结果的不确定性的影响要比其他因素大得多,这就意味着测点数据越多,越能全面反映被测轮廓的特征,得出的结果越能接近最小条件的计算,测量结果的不确定性就越小。但是测点数据越多,计算工作量就越大。

综上所述,现有的形位误差测量数据的计算方法大多得到的是一些近似值,有时还会产生较大的误差,在误差评定的过程中会产生争议。如最小二乘法因其简便、易行,长期以来在国际上十分流行,并被列入英、美等国家标准,且受到国际机械生产技术研究协会(CIRP)计量科技委员会的推荐,但该方法仅仅提供形状误差的近似评价结果,并不能保证解的最小区域性。究其原因,是这些计算方法在形状误差数学模型和处理方法方面不符合形状误差最小条件的定义。

1.3 复杂几何形体形位误差计算的研究现状

随着航天、航空、造船、汽车和模具工业的飞速发展,对产品性能、外形等方面的要求越来越高,参数曲面、曲线的应用也越来越广泛,同时,对其形状误差的测量和计算要求也越来越高。传统的检测方法主要有:(a)借助于仿形装置用较高精度样板进行仿形测量;(b)采用轮廓样板视其间隙的大小评估工件的形状误差;(c)将测量形状轮廓投放在影屏上,与被测件的轮廓投影像进行比较,或用影屏上的标尺进行测量。但是,这些方法存在以下缺点:(a)形状误差的评价需要人的主观参与,计算结果因人而异;(b)检测时间长且检测精度低。显然,上述检测方式已远远不能满足对产品质量控制的要求。

随着计算机的飞速发展和三坐标测量机的产生,为复杂曲面、曲线形状误差的测量开辟了广阔的天地,许多学者在复杂曲面、曲线形状误差的计算理论与方法上进行了研究。

虽然参数曲面、曲线形状误差的计算有一定的手段和方法,然而其计算结果是否满足形状误差计算的最小区域条件却并没有给出形状令人满意的结论。这是因为形状误差的ISO标准和国家标准给出的仅仅是几何定义,并没有给出误差最小区域解的判定方法。有些学者根据形状误差公差带的定义分别提出了极差最小、极大值最小或极小值最大等形状误差直接计算方法和最小区域解判定条件的纯数学描述。但是,复杂曲线、曲面的形状误差按最小条件进行计算,其本质是一个复杂的非线性优化问题,由于其形状误差数学模型的复杂性,运用传统的计算方法难以直接计算,常常采用某种近似方法(如最小二乘法)进行间接计算。

Akira Kyusojin 提出了“Best Fitting”(最佳匹配)曲面形状误差计算方

法,其优点在于通过实测曲面与理论曲面的特征点、特征线和特征面的完全重合,使实测曲面与理论曲面达到“最佳匹配”状态,从而消除大部分因测量基准与设计基准不重合而产生的系统误差。但最佳匹配法还存在着一些缺陷:简单地使特征点、特征线和特征面完全重合,既不是最小二乘意义下的形状误差计算,也不是最小区域意义下的形状误差计算;匹配过程中旋转角度的几何定义不明确,计算复杂且困难;该方法并不能实现预期的“最佳匹配”。有的学者分析了曲面形状误差评价的一般性原则,其核心思想是对实测曲面(由一系列的网格测点组成)进行坐标的平移、旋转变换,使实测曲面与理论曲面的重合达到最小区域状态。然而应用该方法必然要涉及复杂的空间平移和旋转变换,且不能写出复杂的约束条件解析表达式。陈志杨从图形制导和目标函数优化的角度出发,研究基准误差的消除方法,提出一种处理统一于三角 Beizer 曲面模型的曲面最佳匹配算法,但是这种方法的迭代点选取对于迭代效果有直接的影响。

最小条件计算形位误差是国家标准和国际标准的基本原则。但是由于复杂曲面形位误差按最小条件进行计算,其本质是一个复杂非线性最优化问题,建立误差计算的数学模型非常复杂,运用传统的方法难以直接求解。目前主要是采用近似的方法来进行计算,不同的测量方法所得到的结论不一致,在某些场合下可能会引起争议。因此,到目前为止,基于最小条件的复杂轮廓形状误差的计算仍是一个难题。

随着现代制造技术的飞速发展,如何快速准确地计算形状误差已日益显得非常重要。遗传算法在处理这类复杂的非线性优化问题具有独到之处,随着人们研究的不断深入和计算机技术的不断提高,为有效计算形状误差提供了一种新的途径。

1.4 遗传算法产生背景

自从地球上有了生命以来,为了适应生存环境,便开始了漫长的进化过程。1859年,英国生物学家达尔文根据他对生物的长期考察和研究的结果以及人工选择实验,发表了闻名于世的《物种起源》巨著,提出了以自然选择为基础的生物进化论学说,这一学说阐述了生物进化发展来源于三种运动:遗传、变异和选择。生物就是在遗传、变异的综合过程中不断地由低级向高级进化,而选择是通过遗传和变异起作用的,变异为选择提供新的基因,遗传巩固与保存选择的基因,选择则能控制遗传与变异的方向,使之朝着适应环境的方向发展。

达尔文的生物进化论揭示了自然界“物竞天择,适者生存”的进化过程,这一过程使科学家从中受到启迪。进化论的自然选择过程隐含着一种搜索和优化的先进思想,研究人员从生物的进化过程中寻找新的用于人造系统的灵感,并于20世纪50年代中期创立了仿生学,发展出适合现实世界复杂问题优化的模拟进化算法,从而使生命科学与计算科学交叉,构成了计算科学的一个组成部分,其

中取得显著成就的有 Holland 等创立的遗传算法, Rechenberg 和 Schwefel 等创立的进化策略以及 Fogel, Owens, Walsh 等创立的进化规划。近三十年的研究和应用已清楚地表明了模拟自然进化的搜索过程可以产生非常棒的计算机算法, 虽然这些模型还只是自然界生物体的粗糙简化。这三种进化算法侧重的进化层次不同, 其中遗传算法的研究最为深入、持久, 应用面也最广。

20 世纪 60 年代初, 美国 Michigan 大学的 John Holland 教授开始研究自然和人工系统的自适应行为, 在从事如何建立能学习的机器的研究过程中, 受达尔文进化论的启发, 逐渐意识到为获得一个好的算法仅靠单个策略建立和改进是不够的, 还要依赖于一个包含许多候选策略的群体的繁殖, 从而提出了遗传算法的基本思想。

20 世纪 60 年代中期, 基于语言智能和逻辑数学智能的传统人工智能十分兴盛, 而基于自然进化思想的模拟进化算法则遭到怀疑与反对, 但 Holland 及其指导的博士仍坚持这一领域的研究。Bagley 发表了第一篇有关遗传算法应用的论文, 并首先提出“遗传算法”这一术语, 在其博士论文中采用双倍体编码, 发展了复制、交叉、变异、显性、倒位等基因操作算子, 并敏锐地察觉到防止早熟的机理, 发展了自组织遗传算法的概念。与此同时, Rosenberg 在其博士论文中进行了单细胞生物群体的计算机仿真研究, 对以后函数优化颇有启发, 并发展了自适应交换策略, 在遗传操作方面提出了许多独特的设想。Hollistien 在其 1971 年发表的《计算机控制系统的人工遗传自适应方法》论文中首次将遗传算法应用于函数优化, 并对优势基因控制、交叉、变异以及编码技术进行了深入的研究。

人们经过长期的研究, 在 20 世纪 70 年代初形成了遗传算法的基本框架。1975 年 Holland 出版了经典著作“Adaptation in Nature and Artificial System”, 该书详细阐述了遗传算法的基本理论和方法, 提出了著名的模式理论, 为遗传算法奠定了数学基础。同年, DeJong 发表了重要论文“An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive System”, 在论文中, 他将 Holland 的模式理论与计算实验结合起来, 并通过函数优化的应用深入研究, 将选择、交叉、变异操作进一步完善和系统化, 并提出了代沟等新的操作技术, 所得出的许多结论至今仍具有普遍的指导意义。

进入 20 世纪 80 年代末期, 随着计算机技术的发展, 遗传算法的研究再次兴起。遗传算法以其较强的解决问题的能力和广泛的适应性, 深受众多领域研究人员的重视, 遗传算法的理论研究和应用研究已成为十分热门的课题。自 1985 年起, 遗传算法及其应用的国际会议每两年召开一次, 并且在相关的人工智能会议和刊物上大多设有遗传算法的专题。

1.5 遗传算法的研究现状

遗传算法的研究主要分为理论研究和应用研究两大部分。

1.5.1 遗传算法的理论研究

遗传算法的理论研究主要有遗传算法的编码策略、参数选择、基因操作算子及其性能的研究,全局收敛性、搜索效率的数学基础研究,遗传算法的新结构研究,遗传算法与其他算法集成的研究等。

1.5.1.1 遗传算法的数学基础研究

Holland 的模式定理奠定了遗传算法的数学基础,但模式定理中的模式适应度难以计算和分析,Berhke 运用 Walsh 函数和模式转换发展了有效的分析工具,Frantz 首先意识到了使遗传算法的最优解发散的问题,称为遗传算法-欺骗(遗传算法-deceptive)问题,Goldberg 首先运用 Walsh 模式转换法设计出了最小遗传算法-欺骗问题并进行了详细分析和讨论,得出对于第一类最小欺骗问题遗传算法总是收敛到全局最优解,对于第二类最小欺骗问题遗传算法并不总是收敛到全局最优解的结论,但并未给出严格的数学证明。Takahashi 和 Yamamura 等分别从选择-交叉微分方程和 Markov 链两个不同的角度证明了上述结论;Goldberg 等将上述模式分析推广到更高阶数的欺骗问题;Deb 和 Goldberg 给出了判别是否是欺骗问题的充分条件以及判别所需的时间。Barrios 等通过 Walsh 级数分析,证明了对于欺骗问题遗传算法收敛的充分条件,给出了欺骗问题的严格定义。但是,“欺骗问题”也遭到怀疑,Greferstette 认为欺骗性定义是以静态超平面分析这一错误的假设为基础的,它不是引起遗传算法-难问题的根本原因;Liepins 和 Vose 指出,可以通过一个简单的变换将所谓的完全欺骗问题转化为一个遗传算法-易问题;黄焱等分析了基于可调变异算子计算遗传算法的欺骗问题。

1.5.1.2 遗传算法的收敛性分析

近几年,一些学者运用马尔可夫链在遗传算法的全局收敛性的分析方面取得了突破。Goldberg 和 Segrest 首先使用马尔可夫链对遗传算法进行了分析,Rudolph 用齐次马尔可夫链证明了标准的遗传算法不能收敛于全局最优解,Eiben 等运用马尔可夫链证明了保留最优个体的遗传算法概率性全局收敛。Fogel 分析了没有变异算子的遗传算法的渐近收敛性;Qi 和 Palmieri 基于 Markov 链对浮点数编码的遗传算法进行了严密的数学分析,但其分析基于群体无穷大这一假设;罗志军用齐次有限马尔柯夫链对遗传算法全局收敛性进行了分析;何琳等对保留最优个体的遗传算法的收敛性进行了分析;张讲社等提出了一类非齐次、保证收敛且容易判断是否收敛的新型遗传算法,证明了算法收敛的充要条件;林丹等对实数编码的遗传算法的收敛性进行了研究。

与收敛分析紧密相关的是收敛速度问题,这一问题对于建立和使用停止准则以及综合评价遗传算法的各种操作策略具有重要的意义。Back 和 Muhlenbein 分