

///

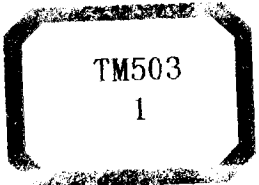
● 机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目
● 河北省教育厅学术著作出版基金资助项目

电器电磁系统 可靠性优化设计 理论与应用

DIANQI DIANJI XITONG KEKAOXING
YOUHUA SHEJI LILUN YU YINGYONG

■ 陆俭国 苏秀苹 著





机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目
河北省教育厅学术著作出版基金资助项目

电 器 电 磁 系 统

可靠性优化设计理论与应用

陆俭国 苏秀革 著



机械工业出版社

h
g-
能
37
in
in
ie-
大
lay
ra-
学,
Op-
om-

作者在电器领域开展了电器电磁系统可靠性设计理论及可靠性优化设计理论与方法的研究,本书是作者对这一方面内容多年研究成果的总结。

本书共分八章。在绪论中对可靠性设计技术、优化设计技术以及可靠性优化设计技术的发展概况进行了阐述;第二章和第三章阐述了可靠性设计的数学基础和基本理论;第四章阐述了电器电磁系统可靠性设计的基本理论;第五章阐述了电器电磁系统最优化设计的常用方法;第六章和第七章分别阐述了电器直流与交流电磁系统可靠性优化设计理论与应用,阐述其数学模型的建立及其结果分析等内容;第八章阐述了电器电磁系统模糊可靠性优化设计的理论与方法。

本书可供从事电工产品科研、设计、制造等领域的科研和工程技术人员参考,也可作为高等学校的教师、研究生和本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电器电磁系统可靠性优化设计理论与应用/陆俭国,苏秀苹著.

北京:机械工业出版社,2003.2

ISBN 7-111-11368-3

I. 电… II. ①陆…②苏… III. 电器-电磁系统-系统可靠性-最优设计 IV. TM503

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第006095号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:牛新国 版式设计:冉晓华 责任校对:张莉娟

封面设计:陈沛 责任印制:闫焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003年2月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm^{1/16}·9.5印张·234千字

0 001—3 000册

定价:20.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

可靠性设计技术与优化设计技术均为现代设计方法的重要组成部分。

可靠性技术是 20 世纪 50 年代发展起来的一门新技术,它包括可靠性设计、可靠性制造、可靠性管理、可靠性试验及失效分析等内容。可靠性设计是制造厂向用户提供产品质量保证的一个重要环节,一个产品可靠性的 高低在很大程度上取决于产品可靠性设计的好坏。可靠性设计技术是考虑产品可靠性的一种设计方法,此方法在机械领域研究较多,在电器领域中研究还较少。

可靠性设计是以概率论与数理统计为数学基础的,其本质特征是把工程中的设计变量作为随机变量,运用随机方法对产品的各种状态出现的随机性进行精确的概率描述,从而对产品的有关参数和指标进行概率设计,把传统设计扩展到新的水平。自 20 世纪 80 年代中期以来,人们认识到设计过程中不仅存在随机现象,同时还存在大量的模糊现象,所以模糊可靠性设计又成为人们研究的热点。

优化设计技术的研究较为普及,在电器领域也有不少人进行过研究,但在将优化设计与可靠性设计结合方面,在电器领域只有作者所在的课题组进行了研究。

电器电磁系统是电磁电器的感测器官,是其重要组成部分,多种电器产品中均有电磁系统。可靠性设计技术的应用可克服电磁系统设计时吸合电压选取的盲目性。可靠性优化设计技术的应用使得设计出的电磁系统不仅能保证可靠性,而且可使各项性能指标达到最优。

本书共分八章。在绪论中对可靠性设计技术、优化设计技术以及可靠性优化设计技术的发展概况进行了阐述,第二章和第三章阐述了可靠性设计的数学基础和基本理论,第四章阐述了电器电磁系统可靠性设计的基本理论,第五章阐述了电器电磁系统最优化设计的常用方法,第六章和第七章分别阐述了电器直流与交流电磁系统可靠性优化设计理论与应用,阐述其数学模型的建立及其结果分析等内容,第八章阐述了电器电磁系统模糊可靠性优化设计的理论与方法。

本书是电器电磁系统可靠性优化设计方面的专著,可为电器电磁系统的设计提供新的设计方法。

本书由陆俭国教授、苏秀苹教授合著,由蔡宣三教授主审。

本书可供从事电工产品科研、设计、制造等领域的科研和工程技术人员参考,也可作为高等学校的教师、研究生和本科生的教学参考书。

清华大学蔡宣三教授对本书进行了深入细致的审阅,付出了巨大的精力,提

出了不少建设性的建议，在此表示最衷心的感谢。王丽华、高炳军、李文华等同志进行了部分书稿的录入和绘图，在此一并表示感谢。

由于电器电磁系统可靠性优化设计理论的研究仍处于起步、发展阶段，加以作者水平有限，所讨论的方法难免有不当之处，恳请读者批评指正。

作 者
2002. 10

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 引言	1
第二节 现代设计方法简述	2
第三节 电器电磁系统设计的研究现状和发展趋势	6
第四节 本书的主要内容	8
第二章 可靠性设计的数学基础	10
第一节 基本概念	10
第二节 可靠性设计常用的概率分布	15
第三节 分布参数的估计	22
第四节 分布类型的确定	27
第三章 可靠性设计的基本原理和计算公式	33
第一节 应力-强度干涉模型原理	33
第二节 应力与强度为同一分布类型时的可靠度	36
第三节 应力与强度的分布类型不同时的可靠度	43
第四节 用数值积分法求可靠度	44
第四章 电器电磁系统可靠性优化设计的基本原理	46
第一节 电器电磁系统吸合可靠性的基本理论	46
第二节 电器电磁系统的吸合电压值的测量	46
第三节 吸合电压数据处理及所服从的分布类型的确定	50
第四节 应用应力-强度干涉模型, 建立吸合可靠度与吸合电压之间的函数关系	56
第五节 电器电磁系统可靠性设计的基本方法	56
第六节 电器电磁系统可靠性优化设计的数学模型	58
第五章 最优化设计	64
第一节 概述	64
第二节 一维搜索法	65
第三节 无约束最优化设计方法	66

第四节	约束最优化设计方法	71
第五节	全局优化设计技术	76
第六节	多目标优化方法	83
第六章	直流电磁系统可靠性优化设计	89
第一节	概述	89
第二节	直流电磁系统结构型式的选择	89
第三节	拍合式电磁系统静态可靠性优化设计	95
第四节	直流螺管式电磁系统静态可靠性优化设计	105
第五节	直流电磁系统动态可靠性优化设计	107
第七章	交流电磁系统可靠性优化设计理论与应用	110
第一节	概述	110
第二节	交流电磁系统的铁心结构类型的特点和选择	111
第三节	交流电磁系统静态可靠性优化设计	114
第四节	交流电磁系统动态可靠性优化设计的数学模型	116
第五节	动态过程的计算	120
第六节	交流电磁系统动态可靠性优化设计实例	122
第八章	电器电磁系统模糊可靠性优化设计	127
第一节	概述	127
第二节	模糊可靠性的数学基础	127
第三节	电器电磁系统模糊可靠性设计	131
第四节	电器电磁系统模糊可靠性优化设计	135
附录		
附表 1	标准正态分布函数 $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-v^2/2} dv$ 数值表	137
附表 2	Γ 函数表	138
附表 3	χ^2 分布下侧分位数表	139
附表 4	t 分布表	142
参考文献		144

第一章 绪 论

第一节 引 言

可靠性技术是 20 世纪 50 年代发展起来的一门新技术,它包括可靠性设计、可靠性制造、可靠性管理、可靠性试验及失效分析等内容。一个控制系统或电力系统的可靠性在很大程度上取决于该系统中所用元件或设备的可靠性,如果元件或设备的可靠性不高,则系统的可靠性也就很难得到保证。电器,作为自动控制和保护元件,广泛用于各种控制系统和电力系统中。随着工业和科学技术的发展,整机或系统变得更为复杂,使用的零部件也越来越多。例如:一台 1.7m 的轧机系统中,除了大量使用无触点控制装置外,还使用了 16 万 7 千余件低压电器元件,其中 43% 是电磁电器;上海宝钢一期工程中使用了约 26 万件低压电器元件^[1]。若电器的可靠性不高,就会造成使用它们的控制系统频繁发生故障而停工,从而导致巨大的经济损失。这是因为一个系统使用的元器件越多,元器件的可靠性对整个系统的可靠性影响越大,如果这个系统为一个可靠性串联系统(即这个系统中只要有一个元器件失效,就会使系统发生故障),则系统的可靠度就等于它所用各元器件的可靠度的乘积^[2]。换言之,一个使用了 20 万个元器件的可靠性串联系统若要保证其系统可靠度为 0.9,则要求每个元器件的可靠度应达到 0.9999994。由此可见,系统越大,对其所用元器件的可靠性要求越高。在这些系统中,电磁电器占很大比例,而电磁电器的感测机构大都是电磁系统。电磁系统是各种电磁电器的重要组成部分,因而电磁系统的可靠性研究是十分重要的。

产品的可靠性可分为固有可靠性和使用可靠性。固有可靠性主要在设计阶段通过产品的可靠性设计与可靠性制造来加以保证,其中可靠性设计尤为重要。所以产品的可靠性设计是制造厂向用户提供产品质量保证的一个重要环节,一个产品可靠性的高低在很大程度上取决于产品可靠性设计的好坏。无数事例说明,设计对于可靠性的影响是最主要的。

可靠性设计就是考虑产品可靠性的一种设计方法,它的任务是运用可靠性工程的方法,使产品在满足一定的条件(如成本、重量、体积、能耗等)下使可靠性较高。

产品可靠性设计方式一般有以下两种:

1) 设计时未规定产品的可靠性指标,这种情况下可按常规的设计方法设计出几个方案,然后对各个设计方案的可靠性进行预计,择优定案。

2) 设计时已预先规定了产品的可靠性指标,在这种情况下先将产品的可靠性指标分配至产品的各零部件或所用的电子元器件,然后进行可靠性技术设计(在可靠性技术设计的同时要考虑产品的性能及费用要求),再进行可靠性预计。若预测出的产品可靠性特征量(如可靠度、失效率或平均寿命等)的数值未达到预先规定的产品可靠性指标,则应采用故障树分析(Fault Tree Analysis,简称 FTA)或失效模式和效应分析(Failure Mode and Effects Analysis,简称 FMEA)等方法对产品进行可靠性分析,找出影响产品可靠性的关键环节,并针对这些关键环节进行改进,来提高产品的可靠性,使之达到预先规定的可靠性指标。

上述第一种设计方式一般适用于尚未积累足够的可靠性数据的产品,而对于已积累了足够的可靠性数据,能预先规定产品可靠性指标的产品,一般采用第二种设计方式。对于第二种设计方式,可进一步结合优化设计技术,将产品的可靠度作为优化目标,使产品在满足一定的条件(如成本、重量、体积、能耗等)下可靠性较高;或将产品的可靠度作为约束条件,在保证一定的可靠性水平的条件下使成本较低(或重量较轻、体积较小、能耗较低)。这种将可靠性设计技术与优化设计技术结合起来,发挥这两种设计方法特长的新设计方法称为可靠性优化设计。而对于电器电磁系统的可靠性优化设计问题,为非凸、非线性规划问题,需采用全局优化设计技术。

由此可见,可靠性设计技术和全局优化设计技术是电器电磁系统设计的两个重要方面,而将此两种先进的设计技术结合起来,应用于电器电磁系统的设计中,不仅可保证产品设计结果为最优,而且可保证产品具有较高的可靠性,因此电器电磁系统的可靠性优化设计方法具有重要的理论意义与应用价值。

第二节 现代设计方法简述

一、概述

传统设计法以经验、试凑、静态、定性为核心,导致设计周期长、设计质量差、设计费用高和产品缺乏竞争力。一种新构思变为产品常常要经几轮研制,待产品定型后可能又落后于时代要求。如何在设计过程中运用新的原理和方法能较真实地反映产品实际行为,从粗略经验估算到详细分析,使产品质量好,可靠性高,设计又快又好,是现代设计方法要解决的问题^[4]。

现代设计方法,既不是单纯指计算机技术,也不单纯指以设计的一般规律和一般途径为研究对象的设计方法学。它应当包括先进的设计理论、设计技术和设计方法,是先进而行之有效的设计思想的集成与统一^[5]。由于设计方法还处于发展中并不断深化,所以现代设计方法的确切内容难以确定,但大致可包括:

- 1) 优化设计;
- 2) 有限元分析;
- 3) 可靠性设计;
- 4) 创新设计;
- 5) 造型设计;
- 6) 价值工程;
- 7) 设计专家系统;
- 8) 计算机辅助设计(CAD)等。

还可以扩展并演变出其他方法,而且这些方法相互结合运用,可以构成具有独特应用对象的方法,如反求工程、系列化模块化设计方法、可靠性优化设计方法等。

现代设计方法在国际上已研究和应用了40多年,在多个领域的应用中取得了极大成效,并正在把设计作为一门科学来研究和深化。国内的研究和应用也有二、三十年的历史,但过去多限于高等院校和研究所。原机电部于1989年正式下达产品开展现代设计方法的通知,作为机械电子工业产品设计的考核和验收指标之一。兵器工业总公司在“八五”期间,亦把现

代设计方法作为企业技术人员知识更新的培训内容^[4]。因而现代设计方法的研究具有十分重要的意义。

二、可靠性设计技术

可靠性理论是近几十年发展起来的一门新兴学科,从20世纪60年代以来,逐渐进入机电产品设计领域,使机械产品设计及电工产品设计发生了深刻的变化,特别是近一、二十年,国内外一些有代表性的机电产品设计方面的著作逐步增添了可靠性的内容,一些国际性的或行业的标准也相继给出可靠性要求或可靠性指标,可靠性设计方法已逐步成为现代设计方法的一个重要组成部分,它比传统设计方法更能反映事物的本质。

可靠性设计与传统设计方法的区别在于:可靠性设计考虑了设计变量的随机性及系统中各组成单元的功能概率关系,并以可靠度或可用度、可靠寿命、失效率等可靠性特征量作为设计目标参数,从产品设计一开始就引入可靠性技术,并贯穿于设计、生产和使用全过程的始终,以得到预期可靠性指标的产品。

可靠性设计的对象可以是系统、设备或单个零件,甚至是针对产品的某一项功能或失效模式。产品的固有可靠性是在设计阶段中形成并在制造过程中得以实现的。由于生产过程中各种因素的影响,产品可达到的可靠性一般不会高于设计可靠性^[4]。

对于系统的可靠性设计,主要根据元件的失效模式,绘出系统的可靠性框图,由各元件的可靠度计算出系统的可靠度^[6];或根据系统的可靠度要求,依据某种原则对各组成单元进行可靠性分配,这可采用可靠性优化设计技术^[7,8]。

目前,在机械零部件的可靠性设计中广泛采用的是应力-强度分布干涉理论^[4,5,9,10,11,12,13]。此模型最早是由Birnbbaum提出的^[14]。Birnbbaum提出了用 $P_f = P(r < s)$ 来估计结构的失效概率。他对此的解释为:机械产品的结构部件是大量生产的,每一个零部件在失效时的强度 r 可被看作是一个随机变量,零部件被装配后所承受的应力达到的最大值 s 也是一个随机变量;如果 $r < s$,则零部件将在使用中失效。因此, $P_f = P(r < s)$ 就是零部件的失效概率。

在此理论中,应力与强度均被看作服从某种分布的随机变量,并将可靠度定义为“强度大于应力的概率”。根据应力分布和强度分布类型的不同,可推导出把应力分布参数、强度分布参数和可靠度三者联结起来的公式,称为“联结方程”,利用此方程即可进行机械零部件的可靠性设计。在可靠性设计时,首先计算出应力分布和强度分布,再进一步计算出此零部件的可靠度。

由此可见,可靠性设计是以概率论与数理统计为数学基础的,其本质特征是把工程中的设计变量作为随机变量,运用随机方法对产品的各种状态出现的随机性进行精确的概率描述,从而对产品的有关参数和指标进行概率设计,把传统设计扩展到新的水平。

随着设计技术的发展,人们认识到设计过程中不仅存在随机现象,同时还存在大量的模糊现象。如何在设计中考考虑模糊现象,又成了人们探索的一大课题。自20世纪80年代中期以来,人们对如何将模糊数学应用于可靠性设计与分析进行了有益的探索^[14]。

一般地,将不考虑模糊现象的可靠性设计称为常规可靠性设计,将考虑模糊现象的可靠性设计称为模糊可靠性设计。常规可靠性设计中可靠性的定义为:产品在规定的条件下,在规定的时间内,完成规定功能的能力。常规可靠性设计中将产品的状态分为二种:完全正常状态和完全失效状态。对于某些相邻指标值,在性能上并无本质差异,却被归属为不同的状态,显然这是不合理的。采用模糊可靠性设计后,有人建议将模糊可靠性定义为:产品在规

定的条件下,在规定的时间内,在某程度上完成规定功能的能力。这样对于某些相邻指标值,可用完成规定功能的程度来反映,即考虑模糊性后,在完全正常状态和完全失效状态之间增加了一个过渡状态,这样考虑更加符合实际情况和人们的思维习惯。

总体上说,常规可靠性设计已较成熟,有较完善的方法分析和计算零部件及系统的可靠性,而模糊可靠性理论现今仍处于起步、探索阶段。

三、优化设计技术

过去几十年间最优化理论与方法得到了迅速发展。最优化方法在数学上是一种求极值的方法,是应用数学的一个分支,现在它已渗透到科学、科技、工程、经济等各领域。

实际上人们在做任何一件事情时,都要用一种标准来衡量一下是否达到了最优。在科学实验、生产技术改进、工程设计、生产计划管理、社会经济问题中,人们总希望采取种种措施,以便在有限的资源条件下或规定的约束条件下得到最满意的效果。在进行产品设计时应用最优化技术,可以帮助我们尽快地选择出最优化方案。

数学上最优化问题的研究,早在古希腊时代就已出现,例如毕达哥拉斯发现了黄金分割比 0.618。0.618 法在优化中是一种有效的一维搜索最优化方法^[15]。

科学技术在历史上有许多最优化问题。例如著名的捷线问题(或称最短时间问题)、货郎担问题、“自由能量”最小时化学系统达到平衡、高斯的最小二乘设想是使试验数据和拟合曲线的误差平方和为最小等。

在 20 世纪 50 年代以前,解决最优化问题的数学方法只限于古典求导和变分法(求无约束极值),或是拉格朗日(Lagrange)乘子法解决等式约束下的条件极值问题。这类求可导函数或泛函数极值的充分必要条件称为古典最优化问题。

随着科学技术的发展,许多最优化问题已经无法用古典方法来解决。计算机的快速发展为最优化方法的发展提供了可行的手段,自 20 世纪 50 年代以来已经有许多解决最优化问题的计算机算法。解决最优化问题时,首先需要建立数学模型。最优化问题的数学模型一般包括目标函数和约束条件。

根据目标函数和约束条件的不同,可按不同的分类方法将最优化问题分成许多类型,不同类型的最优化问题采用不同的最优化方法。

无约束最优化问题(无约束条件)求极值时,问题的最优解就是目标函数的极值,若目标函数为简单的显函数时可采用古典最优化方法;若目标函数的表达式很复杂,甚至是隐函数时,则需采用直接搜索法来求极值。

有约束最优化问题求极值时,可将有约束问题转化为无约束问题,采用无约束时的最优化方法来解决,也可在优化过程中判断是否满足约束条件。

对于各种类型的优化问题均有多种实用可行的优化方法。

工程设计中的许多问题都可构成优化问题,它要求满足相互冲突的设计要求,而确保达到最佳性能水平。通常这些问题具有非线性和非凸性质,所以在搜索区域中它们可能具有多个局部极值点。用基于梯度的搜索技术来解决这些问题通常可得到初始点附近的最优解^[16,17]。此最优解不一定是整个区域中最优解,故称为局部最优解。这种只能得到局部最优解的方法称为局部最优化方法。人们希望得到整个区域的最优解,即全局最优解。找全局最优解的方法称为全局最优化方法。全局最优化在最优化工程设计中具有特别重要的意义,越来越受到重视。

局部最优化技术已得到了充分研究,而全局最优化是一个有待于开发的领域,一些有效的方法只适用于线性情况和凸规划问题等特殊情况。

全局优化方法大致分为两大类:确定性方法和随机性方法。基于区间运算的一些搜索技术在全局优化中是很有效的确定性方法。在求解复杂的优化问题的近似最优解时人们已认识到直接搜索技术的潜力。在近似求解全局优化问题时被认为是最有前途的方法是:模拟退火法(SA)、遗传算法(GA)、列表寻优法(Tabu算法)和神经网络法等。模拟退火法和遗传算法均属于随机方法。模拟退火法是将物体系统能量减少的退火过程与优化问题的目标函数最小化进行类比,它已在理论上被证明是一种以概率1收敛于全局最优解的优化算法。但其参数难以控制,例如存在温度 T 的初始值设置问题、退火速度问题、温度管理问题等。遗传算法是基于自然界遗传和选择原理在优化搜索时模拟生命进化过程,它在优化时不易陷入局部最优,并适合于大规模并行分布处理,且易和其他技术相结合,形成性能更优的求解方法,但遗传算法存在着局部搜索能力较差的缺陷。Tabu算法实质上是一种确定性的超直接法,利用约束移动的观点甚至在不能改进移动的情况下探索搜索空间(允许一定的上山操作),使用列表的形式记录搜索路径的历史信息,不会回到先前出现的局部极值点^[16,18]。有人以货郎担(TSP)问题为例比较了GA、SA、Tabu的搜索能力^[18];与SA、Tabu相比,GA的效率及求解质量要差一些:SA的解质量比较高,但温度管理比较麻烦,常需实验的多次调整;Tabu比SA有较早收敛的倾向,但SA在合理的温度管理情况下,解的质量较高。神经网络法也是目前研究最多、应用很广的一种有效的全局优化算法,在优化计算中使用最多的两种神经网络是BP(Back-Propogation)网络和Hopfield网络。为了克服BP网络学习效率低和局部最优的缺点,有人将小波神经网络用于全局优化。但这种网络也有一些缺点,如应用于多参数目标函数时运算时间长、难于胜任有约束条件的情况等^[19,20,21]。最近,又有人模仿人体的免疫功能,将免疫算法用于优化技术^[22,23]。

在各个领域都已认识到全局优化的重要,因而全局优化技术的研究是当前国际上工程界研究的热点之一,新的算法不断出现,各种算法都在不断发展。人们都在想尽各种办法,力求能找到收敛速度快、解的质量好、效率高、鲁棒性好的优化算法。

四、可靠性优化设计技术

在目前优化设计中常常忽略了设计参数的离散性。仅从设计的角度出发,把各个设计参数看成是单值的,没有考虑其在加工装配中的误差、材料性能和载荷离散性等的影响,这种设计结果只能反应在假定条件下的最优设计方案,而在实际应用中,由于设计参数的离散性,使之成为非最优设计,甚至是不可行的设计方案。因此,设计人员只有充分考虑各设计参数离散性的影响才能使设计更合理、适用和经济。

可靠性设计技术考虑了参数离散性的影响,运用概率与数理统计的理论,参考原有的经验数据,结合传统的设计理论和方法,使设计出的产品能满足一定的可靠性要求。

但可靠性设计一般并没有考虑最优化设计,不能保证其设计结果是所有满足要求的产品中最优的,例如一个零部件在经过可靠性设计后,并不能保证它的工作性能或参数就一定具有最佳状态,所以,要使零部件(产品)既保证满足可靠性要求,又保证具有最佳工作性能或参数,就必须将可靠性设计与最优化设计有机地结合起来,只有这样才能全面发挥这两种设计方法的特长,使其具有更先进、更实用的设计特点,这就是所谓的可靠性优化设计方法^[24]。而这些方法需要借助于计算机辅助设计(CAD)技术来实现。可靠性优化设计技术已

在许多领域得以应用^[25]。

可靠性优化设计的基本思想是：要求零部件在满足一定性能指标的条件下，使其可靠度达到最高；或者使零部件达到最佳性能指标时，要求它的可靠度不低于某一规定水平。一般说来，后一种方法更为实用。可靠性优化设计方法的发展依赖于可靠性设计技术和优化设计技术的发展，随着可靠性技术和优化设计技术的进一步发展，可靠性优化设计必将在工程设计中发挥巨大的作用。

第三节 电器电磁系统设计的研究现状和发展趋势

一、概述

长期以来，人们一直在寻求电器电磁系统的最佳设计方案，希望制造出更加质优价廉的电磁系统。在电磁系统传统的设计方法中，人们尽可能地利用各种数学和实验方法来寻找电磁系统各尺寸之间的最合理比例。但是，由于有关理论及数学方法和计算手段的限制，这些最优的比例关系只能是局部的，而且多以定性分析为主。电磁系统优化设计真正得以在工程中的应用，是从计算机问世以来逐步发展起来的。它使得工程技术人员可以从多方面计算分析电磁系统各种特性，为优化设计打下了坚实的基础。电磁理论及数学方法的不断完善又推动了电磁系统优化设计的发展，特别是最优化方法的应用，使得在满足一定设计要求的条件下，寻找某一（某些）最佳经济技术指标成为可能^[26]。

国外是从 20 世纪 60 年代中期开始电磁系统优化设计方面的研究的，70 年代末，我国也开始了这方面的研究工作。到 80 年代后期，对电磁系统优化设计的研究达到了高潮。起初人们是在传统设计的基础上沿用静态指标（与电器动作过程无关的指标），如体积或重量或成本或功率消耗等进行优化，收到一定效果^[27,28]。静态优化数学模型如式（1-1）所示。

$$\begin{aligned} \min & m(X) \\ \text{s. t. } & F_{xi}(X) - K_{fi}F_{fi} \geq 0 \quad i=1,2,\dots,P \\ & \tau_m - \tau(X) \geq 0 \\ & B_m - B(X) \geq 0 \\ & X_{imin} < X_i < X_{imax} \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中 $F_{xi}(X)$ ——工作气隙为 δ_i 时的电磁吸力；

F_{fi} ——工作气隙为 δ_i 时的反力；

K_{fi} ——吸力裕度系数， $K_{fi} \geq 1$ ；

τ_m ——最高允许温升；

$\tau(X)$ ——温升；

B_m ——最大允许磁感应强度；

$B(X)$ ——电磁系统中磁感应强度；

X_{imin} ——变量 X_i 的下限；

X_{imax} ——变量 X_i 的上限。

在此数学模型中，在各离散点处吸力 F_{xi} 应高于反力 F_{fi} ，高多少取决于吸力裕度系数 K_{fi} 的数值。 K_{fi} 的选取将关系到优化结果的好坏。如果 K_{fi} 选得太大，则得到的设计方案静态吸力特性较高，触头及铁心闭合时运动速度太大，撞击能量增大，这一方面会降低电磁系统的机械

寿命和电寿命;另一方面使接触器触头的回跳加剧而造成触头电磨损增加,甚至会造成触头粘接。如果 K_{f} 选的太小,则得到的设计方案静态吸力特性较低,有可能导致电磁系统不能可靠吸合。究竟选取多大的 K_{f} 值最佳,事先很难确定。于是人们提出了电磁系统的动态优化设计概念^[29,30]。

若在最优化数学模型中包含有动态特性,则此优化问题称为动态优化问题。动态特性是电磁系统动作过程的真实反映,因而建立动态优化数学模型,采用动态优化设计技术设计出的产品将具有更佳的性能。

交流电磁系统动态过程的计算是动态优化的关键。对于不同的合闸初相角,动态过程是不同的。所以设计时需要计算不同合闸初相角下的动态过程。这样,对于一个设计点,需要多次调用动态过程的求解程序,计算工作量是相当大的。对于动态特性的计算研究已有大量的文献发表,如文献[31~39]等。

这一阶段多采用局部优化的算法。20世纪90年代以后,随着全局优化方法的研究进展,在电磁系统优化设计中也开始探索适应性强、收敛性好、可找到全局最优解的全局优化方法。

二、电器电磁系统的全局优化设计技术

电器电磁系统的优化设计国内外已有人作了不少研究,但多采用局部优化方法。电磁系统的优化设计问题是非线性、非凸规划问题,因而探索一种快速、实用的全局优化方法是电磁系统优化工作的重要课题之一。

近年来虽已有人将全局优化方法用于电磁问题的优化设计中,但多为变量数较少的情况。文献[40]采用自适应模拟退火法对真空组合电器三维静电场逆问题进行了优化,有三个优化变量;文献[41]对磁谐振成像系统用直接搜索与模拟退火结合的算法进行了优化;文献[42]采用遗传算法对发动机的极面形状进行了优化;文献[43]采用遗传算法对CJ20—100交流接触器电磁系统进行了多目标动态规划优化设计,优化变量数为8个;文献[19、20]在电磁优化问题中应用了神经网络,文献[19]利用人工神经网络对变压器的C形铁心和壶形铁心进行了优化;文献[20]利用人工神经网络对磁极极面形状进行了优化,以使得气隙中磁密为常数。文献[21]用小波神经网络对交流真空接触器直流电磁系统进行了优化,优化变量数为2。文献[44]将模糊推理技术引入了模拟退火过程,使SA算法可以充分利用已搜索过的空间信息来指导以后的寻优,大大改善了SA算法的收敛性能,并将此智能化SA算法应用于磁控阴极溅射靶的优化设计问题,使得收敛速度快二倍以上;文献[45]采用Tabu算法对永磁起动机进行了优化,取7个参数作为优化变量。文献[46、47、48]在电器电磁系统可靠性优化设计中采用了Tabu算法。近几年来,IEEE磁学学报上及磁学会议论文集每年都要刊登大量的有关各种电磁问题优化方面的论文,其中关于形状优化的论文比较多见。

三、电器电磁系统的可靠性设计技术

电器电磁系统是电器产品的主要部件和关键件,优良的电器产品是与其电磁系统的高可靠性分不开的。

可靠性设计技术和全局优化设计技术是当前国际上研究的热点,但将两者结合用于电器电磁系统的设计中尚处于起步阶段。对于交流电磁系统的优化设计,在20世纪80年代末已不少人进行了研究,有许多文献发表。例如为提高电磁系统的机械寿命和电寿命,采用了动态优化设计技术。这主要是为了考察触头碰撞及动静铁心碰撞时的速度,若速度大,则碰撞时不仅机械磨损加剧,而且动触头有可能反弹开,从而造成电磨损加剧,降低了电器电磁系统的机

械寿命和电寿命,故这两个速度是很重要的指标,所以设计时以追求这两个速度最小为目标进行优化设计,以提高电磁系统的机械寿命和电寿命,提高其寿命指标^[29,49,50]。这样设计出的产品在理论上是最优的,但是,按设计最优解加工出样品后,由于制造误差及材料性能的分散性,将会使产品的性能有一定的分散性。例如,20 只某型交流接触器吸合电压的实测数据及其统计结果分别如表 1-1、表 1-2 所示。

表 1-1 某型交流接触器吸合电压的实测数据 (单位:V)

260,	268,	276,	278,	280,	282,	278,	272,	268,	272,
268,	280,	272,	275,	288,	275,	275,	272,	276,	265,

表 1-2 某型交流接触器吸合电压实测数据的统计结果

U_e/V	$U_{\min}/V$	$U_{\min}/U_e$	$U_{\max}/V$	$U_{\max}/U_e$	U_{pj}/V	U_{pj}/U_e	σ/V
380	260	68%	288	76%	274	72%	6.39

由表 1-1,表 1-2 可见,额定电压 U_e 为 380V 的接触器实际吸合电压值具有很大的分散性。其中最小吸合电压值 $U_{\min}$ 为 260V,为额定电压的 68%;最大吸合电压值 $U_{\max}$ 为 288V,约为额定电压的 76%。吸合电压均值 U_{pj} 为 274V,标准离差 σ 为 6.39V。

在设计时,一般将激磁线圈加某一电压时电磁系统能可靠吸合作为约束条件之一,选取这一吸合电压值应是设计的关键。因如果设计时这个电压取得太高,按设计最优解加工出样品后,由于制造误差及材料性能的分散性,将会使一部分产品吸合电压不能满足产品标准规定要求而成为不合格品。如果这个电压选得太低,正常工作时,会使吸合过程中触头碰撞及动静铁心碰撞速度太高,从而降低机械寿命和电寿命。一般文献中选取 80%额定电压时能可靠吸合作为约束条件,显然,此电压取得偏高;文献 [49] 指出:为使交流接触器在较低电压下仍能可靠吸合,分别选取可靠吸合电压为 75%和 80%额定电压时对接触器弹簧参数进行优化。看来当时其作者已认识到选取可靠吸合电压的问题,但关于如何合理选取这一电压没有讨论。最早提出将可靠性设计理论运用于电器电磁系统设计中的是本书作者之一。他 1988 年在第 36 届美国继电器年会上发表的一篇文章^[51]中指出:继电器吸合电压可看作随机变量,当吸合电压小于等于吸合电压允许值时电器为合格品,否则为不合格品,运用应力-强度干涉模型给出了产品不合格概率的计算公式,同时也给出了当给定不合格概率时,吸合电压均值的计算方法,并以此均值作为设计继电器电磁系统时激磁线圈上所加电压值。

此理论的提出为电器电磁系统的设计提供了一种新的方法,从而揭开了电器电磁系统可靠性设计理论与方法研究的序幕。

在以后的这些年里,电器电磁系统可靠性设计理论与方法不断发展,文献 [52] 提出了吸合可靠性理论。文献 [46、47、48、53] 分别提出了交直流电器电磁系统的可靠性优化设计理论与方法。

第四节 本书的主要内容

可靠性优化设计是电器电磁系统研究领域的一个重要课题。本书阐述了电器电磁系统可

可靠性设计、优化设计以及电器电磁系统可靠性优化设计的有关理论与方法。本书共分八章。第一章概述了可靠性设计、优化设计及其电器电磁系统可靠性设计、优化设计的发展概况。第二章介绍了可靠性设计所用到的数学基础,包括一些基本概念、常用的分布类型及其分布参数的估计方法、分布类型的确定方法等。它是概率论与数理统计的基础知识,也是进行可靠性设计的必备知识。第三章介绍了可靠性设计的基本原理,应力、强度为不同的分布类型时的可靠度计算公式,以及可靠度计算的数值积分法,是进行可靠性设计的基础。第四章介绍了电器电磁系统可靠性设计的基本理论与方法,以及电器电磁系统可靠性优化设计数学模型的一般建立方法。第五章介绍了实用有效的最优化设计方法,主要包括以下内容:一维搜索法中介绍了黄金分割法;无约束最优化方法中介绍了坐标轮换法、单纯形加速法;约束最优化方法中介绍了随机试验法、复合形法、SWIFT法等;全局最优化设计技术中介绍了自适应模拟退火法(SA)、列表寻优(Tabu)法、Tabu与SA的混合算法、遗传算法等;对于多目标优化方法介绍了统一目标法、主要目标法、协调曲线法和对策论方法等。第六章讨论了直流电磁系统可靠性优化设计的理论与方法,介绍了不同结构型式直流电磁系统的特点及选型方法,对拍合式和螺管式电磁系统静态和动态可靠性优化设计数学模型的建立方法进行了讨论,并给出了拍合式直流电磁系统可靠性优化设计的实例。第七章讨论了交流电磁系统可靠性优化设计的理论与方法,介绍了不同结构型式交流电磁系统的特点及选型方法,讨论了交流电磁系统静态和动态可靠性优化设计数学模型的建立方法,以及动态过程的计算等内容,并给出了设计实例。第八章初步讨论了模糊可靠性设计的基本理论与方法,介绍了模糊数学的一些有关知识,讨论了电器电磁系统模糊可靠性优化设计的方法。

第二章 可靠性设计的数学基础

第一节 基本概念

由可靠性的基本概念及衡量指标可知,决定产品可靠性的主要因素往往与一些随机现象有关。故障或失效就是一个随机事件,故障前的工作时间是个随机变量,导致产品失效的老化过程又是一个随机过程。因此,评价产品可靠性的指标都具有概率性质。

为了科学描述这些随机现象并进行定量估计,本节介绍可靠性设计中常用的有关概率论及数理统计的基本概念。

一、随机事件和概率

在科学试验或观察中,总有一些试验具有以下特性:可以在相同的条件下重复地进行;而每次试验或观察的可能结果不只一个,并且能事先预料所有可能结果;但进行一次试验之前不能确定哪一个结果会出现。将这种试验或观察称为随机试验,简称试验。在随机试验中,对一次试验中可能发生也可能不发生、而在大量重复试验中却具有某种规律性的现象,称为这试验的随机事件,简称事件。电器电磁系统的可靠吸合与否、可靠释放与否等,就是典型的随机事件。

概率是用来衡量随机事件发生可能性大小的一个尺度。它与事件发生的频率有关。设事件 A 在相同的条件下重复进行的 n 次试验中发生了 m 次,则称 m/n 为事件 A 在此 n 次试验中发生的频率。

概率的定义是:在相同条件下进行大量重复试验,随着试验次数的增多,某一事件 A 发生的频率总是围绕某一个定值 P 波动,就将 P 称为事件 A 发生的概率,表示为 $P(A)$ 。它具有如下性质,

$$0 \leq P(A) \leq 1 \quad (2-1)$$

当在试验中事件 A 必然发生时,称 A 为必然事件,则 $P(A) = 1$;当在试验中事件 A 不可能发生时,称 A 为不可能事件,则 $P(A) = 0$;若在试验中事件 A 与事件 B 必有一个发生、一个不发生时,称 A 与 B 为相互对立事件,事件 B 记为 $\bar{A}$;若试验中事件 A 的发生与否对 B 的发生与否无影响,则称事件 A 和 B 为相互独立事件;将试验中事件 A 与 B 同时发生的事件称为事件 A 和 B 的积事件,记做 AB 。

在可靠性设计中,常用的概率运算定理:

(1) 互补定理 设 $\bar{A}$ 是事件 A 的对立事件,则事件 $\bar{A}$ 的概率

$$P(\bar{A}) = 1 - P(A) \quad (2-2)$$

(2) 乘法定理 若事件 A 和 B 为相互独立事件,则 A 和 B 积事件的概率是各自发生概率的乘积,即

$$P(AB) = P(A)P(B) \quad (2-3)$$

若事件 A 和 B 不是相互独立事件,则 A 和 B 积事件的概率为