

低压断路器的 建模仿真技术

李兴文 著



低压断路器的建模 仿真技术

李兴文 著



机械工业出版社

本书强调理论密切联系工程应用,并且特别重视物理建模的科学性以及仿真分析结果有效性的实验验证。

本书涉及电磁机构、发热和电动力、电弧电接触等电器基础理论,并将其体现在操作机构、脱扣器和触头灭弧系统等三个低压断路器主要组成部分的建模仿真技术上,主要包括:操作机构的运动特性优化设计与寿命评估,不同结构形式的电磁脱扣器和热脱扣器保护特性的优化设计,触头系统的电动稳定性和热动稳定性计算,电弧演变过程的数学建模与仿真和短路开断过程的仿真分析等,其中大部分内容来自低压断路器实际产品的工程设计,结构及设计参数描述具体、翔实,对工程技术人员进行产品设计和科技人员了解低压断路器的建模仿真技术有很大帮助。

本书可供从事低压电器设计、制造、试验和运行方面的有关工程技术人员参考,也可作为高等院校相关专业本科生、研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

低压断路器的建模仿真技术/李兴文著. —北京:机械工业出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-111-58417-9

I. ①低… II. ①李… III. ①低压断路器-系统建模②低压断路器-系统仿真 IV. ①TM561

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第270095号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:林春泉 责任编辑:林春泉

责任印制:常天培 责任校对:刘丽华 任秀丽

北京京丰印刷厂印刷

2018年1月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·15印张·360千字

标准书号:ISBN 978-7-111-58417-9

定价:59.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

我国低压电器行业经过了 60 多年的发展, 目前已成为全球低压电器最大制造国。新能源发电系统、低压直流电网等也为低压电器行业的跨越式发展和自主创新提供了难得的机遇, 同时与国际知名低压电器公司的竞争也日趋激烈。因此, 在低压电器小型化、智能化、高性能、节能环保的发展趋势下, 如何提高企业的核心竞争力, 使我国进一步成为低压电器强国, 是低压电器行业所面临的重要问题和现实需求。

低压断路器的性能在很大程度上反映了一个国家低压电器的设计与生产水平。我国低压断路器行业目前正处于摆脱以仿制为主、“经验设计 + 试验验证”相结合研发模式的关键时刻, 进一步推广低压断路器的数字化建模和仿真技术对推动整个行业的技术进步至关重要。

本书是西安交通大学低压电器科研组近 15 年来在低压断路器的建模仿真技术领域研究工作的系统总结。通过与国内外低压电器企业的产学研合作, 将建模仿真技术应用于已有产品开断性能的提升和新系列产品的研发, 并在大量的工程实践中不断完善、总结, 形成了具有一定特色的技术体系。

本书第 1 章绪论, 主要介绍了低压断路器的建模仿真技术发展概况; 第 2 章和第 3 章围绕低压断路器操作机构, 介绍了操作结构动态特性仿真分析以及疲劳寿命的评估方法; 第 4 章和第 5 章主要介绍了电磁、热脱扣器保护特性的计算方法, 低压断路器及系统的热分析技术; 第 6 章、第 7 章和第 8 章围绕低压断路器的触头灭弧系统, 分别介绍了吹弧磁场、电动斥力和气动斥力的建模仿真方法, 短时耐受电流的计算方法及不同因素的影响, 低压断路器开断过程的建模方法以及电弧磁流体动力学仿真的应用。本书在内容上注重理论联系工程实际, 力求能够使读者对电器基础理论有更深刻的认识, 并帮助读者提高将理论应用于低压电器产品设计的能力。

本书是在 [陈德桂] 教授与作者 2009 年合著出版的《低压断路器的虚拟样机技术》基础上, 结合低压断路器建模仿真技术的发展趋势和新近研究成果, 以及读者的反馈, 做了较大的删减和补充, 力求更好地为产品设计提供有益参考, 更有效地服务于人才培养。

[陈德桂] 教授长期担任中国电工技术学会低压电器专委会主任和荣誉主任、西安交通大学电器教研室主任, 在科研方向开拓、人才培养、成果推广应用等方面为低压电器行业的发展做出了突出的贡献, 也对本书做出了历史性的贡献。此时此刻, 尤为怀念在先生指导下的学习和工作时光, 先生慈祥的目光、谆谆的教诲永留心间, 激励着作者在教学科研的道路上砥砺前行。也谨以此书深切缅怀恩师!

本书的内容包括了本科研组毕业的博士孙海涛、张敬菽、向洪刚、戴瑞成、汪倩、屈建宇和硕士黄琳敏、王云峰、康艳、童争光、宋浩永、段建家、陈轲娜、胡书通、李欣、吴刚等的部分研究成果, 特此表示感谢。

本书的工作是在多项国家自然科学基金项目、人才计划支持项目、电力设备电气绝缘国

家重点实验室自主课题及与国内外低压电器企业的合作项目等支持下完成的，特此表示感谢。

由于作者水平有限，不妥和错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

李兴文

2017 年 10 月于西安

目 录

前言

第1章 绪论 1

1.1 概述 1

1.2 低压断路器的建模仿真技术发展 概况 2

第2章 低压断路器操作机构动态特性的 仿真与优化设计 4

2.1 低压塑壳断路器操作机构的仿真 建模 4

2.1.1 低压塑壳断路器操作机构简介 4

2.1.2 操作机构仿真模型的建立 4

2.2 单断点塑壳断路器操作机构的仿真 分析 7

2.2.1 单断点塑壳断路器操作机构动态 特性的仿真 7

2.2.2 ADAMS 软件中触头参数的测量 方法 9

2.3 计及电动斥力效应的断路器分断过程 仿真分析 12

2.3.1 分断短路电流的实验研究 12

2.3.2 对动触头所受电动斥力的分析 13

2.3.3 计及电动斥力效应的断路器分断 过程仿真分析 16

2.4 低压塑壳断路器操作机构的优化 设计 21

2.4.1 影响断路器分断速度的主要 因素 21

2.4.2 以关键轴的位置作为设计变量的 操作机构优化设计 24

2.5 旋转双断点塑壳断路器操作机构的仿 真与优化设计 26

2.5.1 影响断路器机构运动速度的主要 因素 26

2.5.2 旋转双断点塑壳断路器触头卡住 机构的研究分析 28

2.6 框架断路器操作机构的仿真与优化 设计 33

2.6.1 框架断路器的操作机构 33

2.6.2 操作机构仿真模型的建立 34

2.6.3 ADAMS 软件中的仿真结果 35

2.6.4 操作机构的优化设计 36

2.7 ADAMS 软件的二次开发技术 39

2.7.1 用户界面的开发 39

2.7.2 依靠接口程序的二次开发 40

本章参考文献 42

第3章 低压断路器操作机构应力分析 与疲劳寿命评估 43

3.1 框架断路器操作机构应力应变的仿真 分析 43

3.1.1 动态应力应变的计算方法 43

3.1.2 虚拟样机模型的建立 45

3.1.3 刚-柔耦合混合动力学模型的 建立 46

3.1.4 上连杆应力应变分析 47

3.2 框架断路器操作机构主要构件疲劳 寿命的评估 51

3.2.1 低压断路器操作机构疲劳寿命 的评估方法 51

3.2.2 打击杆的寿命分析 52

3.2.3 轴销的寿命分析 54

3.3 框架断路器操作机构主要构件结构的 优化设计及试验 56

3.3.1 打击杆的结构优化 57

3.3.2 轴销的结构优化 59

3.3.3 疲劳寿命的试验 62

本章参考文献 63

第4章 电磁脱扣器保护特性的 计算 64

4.1 概述 64

4.2 拍合式电磁脱扣器保护特性的仿真与 分析 66

4.2.1 脱扣器静态特性的计算 66

4.2.2 脱扣器保护特性的计算 67

4.2.3 拍合式磁脱扣器保护特性的

分析	71	5.6.1 热脱扣器等效热路的建立	112
4.3 螺管式磁脱扣器保护特性的仿真 与分析	72	5.6.2 热路参数的计算	113
4.3.1 螺管电磁铁从磁场仿真到等值 磁路的建立	72	5.6.3 热脱扣器保护特性的等效热路的 求解与实验对比	115
4.3.2 静态特性的磁路计算方法	74	5.7 基于电磁热流耦合有限元法的低压 配电柜热分析	117
4.3.3 动态特性的计算	75	5.7.1 电磁热流耦合的分析方法	117
4.4 高速直流断路器用磁脱扣器调节特 性的分析	77	5.7.2 低压配电柜温升特性的仿真及 实验研究	121
4.4.1 高速直流断路器用磁脱扣器的 工作原理	77	5.7.3 强迫对流对低压配电柜温升特 性的影响	123
4.4.2 高速直流断路器用磁脱扣器的 静态特性与动态特性	77	本章参考文献	124
4.4.3 高速直流断路器用磁脱扣器的 调节特性分析	80	第6章 吹弧磁场、电动斥力及气动 斥力仿真与分析	126
4.5 电磁脱扣器的优化设计	81	6.1 概述	126
4.5.1 脱扣器几何参数的优化设计	81	6.2 吹弧磁场的分析	127
4.5.2 反力弹簧参数的优化设计	84	6.2.1 计算方法与步骤	127
4.5.3 小规格拍合式脱扣器的改进 设计	90	6.2.2 4种不同结构的触头灭弧系统的 吹弧磁场的分析	128
4.5.4 电磁脱扣器系列化设计	92	6.3 电动斥力的分析	131
4.5.5 带永久磁铁脱扣器抑制电流极性 影响的方法	95	6.3.1 计算方法与步骤	131
本章参考文献	98	6.3.2 两种U形静触头导电回路的电动 斥力与吹弧磁场对比的分析	133
第5章 低压断路器热分析与热脱扣器 保护特性的计算	99	6.4 塑壳断路器中的电动斥力	137
5.1 热分析的有限元法和热网络法	101	6.4.1 计算模型	137
5.1.1 用有限元法计算断路器的 温度场	101	6.4.2 计算结果及分析	139
5.1.2 热网络法	102	6.4.3 实验方法及结果分析	142
5.2 热源的计算	103	6.4.4 塑壳断路器触头斥开时间与触头 压力的确定	143
5.2.1 触头接触电阻	103	6.5 气动斥力的研究	144
5.2.2 接线端接触电阻	104	6.5.1 实验模型及方法	145
5.3 导热系数和散热系数的确定	105	6.5.2 预期短路电流和触头间距对气动 斥力的影响	148
5.3.1 导热系数	105	6.5.3 产气材料对气动斥力的影响	151
5.3.2 散热系数	105	6.5.4 出气口大小对气动斥力的 影响	151
5.4 连接导线的处理	107	本章参考文献	154
5.5 基于三维有限元法的断路器热 分析	109	第7章 短时耐受电流的计算	155
5.5.1 小规格断路器的热分析	109	7.1 概述	155
5.5.2 大规格断路器的热分析	111	7.2 框架断路器触头系统电动稳定性的 分析	156
5.6 热脱扣器保护特性的等效热路计算 方法	112	7.2.1 电动稳定性的计算模型	156

7.2.2 邻近效应对电流分布的影响	159	8.3 微型断路器开断过程的仿真分析	183
7.2.3 电动斥力的分布	161	8.3.1 开断特性的仿真	183
7.2.4 考虑电动斥力对导电斑点面积的影响	162	8.3.2 不同开断条件下的样机限流特性的仿真和分析	186
7.2.5 侧偏力矩与滑动力矩	163	8.4 SMCB 开断过程的仿真方法	189
7.3 短时耐受电流过程热稳定性的分析	165	8.4.1 数学模型	190
7.3.1 热稳定性的计算模型	165	8.4.2 计算方法	191
7.3.2 热稳定性计算结果的空间分布	168	8.4.3 额定电流 35A 的 SMCB 开断过程仿真及实验结果	192
7.3.3 热稳定性计算结果的时间变化	170	8.5 磁流体动力学电弧数学模型	198
7.3.4 短时耐受实验后触头烧蚀斑点形貌的分析	171	8.5.1 弧柱区物理过程及其控制方程	199
7.4 合闸相角和频率对电动稳定性的影响	173	8.5.2 代表性断路器电弧模型	204
7.4.1 合闸相角对电动稳定性的影响	173	8.5.3 电弧等离子体的基本物性参数	205
7.4.2 频率对电动稳定性的影响	175	8.5.4 灭弧室结构参数对空气介质开关电弧特性的影响	209
本章参考文献	178	8.5.5 产气材料和金属蒸汽对空气介质开关电弧特性的影响	218
第 8 章 低压断路器开断过程的仿真分析	179	8.6 基于磁流体动力学电弧模型的低压断路器开断特性的仿真与分析	225
8.1 概述	179	8.6.1 MCCB 的仿真分析	225
8.2 简单的尼迈亚电弧数学模型	182	8.6.2 MCB 的仿真分析	228
		本章参考文献	230

第1章 绪 论

1.1 概述

从19世纪末爱迪生(T. Edison)建立世界上第一套电力系统开始,人们就开始了以空气为灭弧与绝缘介质的开关电器研究。一个多世纪以来,已经由在大气中自然拉长电弧而分断电路的简单开关,发展到门类齐全的现代低压电器,主要包括断路器、熔断器、继电器、接触器、起动器等,被广泛地应用于交流1200V、直流1500V及以下的系统中。低压电器涉及等离子体物理、电磁学、流动与传热、机械、电子信息等多门学科,是机、电、热等相互作用下的耦合物理系统。

以空气为灭弧和绝缘介质的低压电器具有强限流能力,开断容量大,有可见的明显断口,尺寸小,价格低,承受过电压和过电流能力强,功率损耗低等特点,在人类生活的各个角落发挥着其不可替代的电力控制和保护功能,从而在国民经济发展中占据着重要的地位。据统计,80%以上的发电电量是通过低压电器分配使用的。我国低压电器行业经过了60多年的发展,目前年产值超过600亿元,已成为全球低压电器最大制造国。

我国低压电器行业经过多年的努力,创新研发能力不断提高,拥有完全自主知识产权的新产品也越来越多,其整体技术指标已达到国际先进水平,部分指标甚至实现了国际领先,而且正逐步摆脱以仿制为主的设计模式。但是,应该看到长期以来,以ABB、施耐德、西门子、三菱、伊顿等为代表的国际知名低压电器公司拥有丰富的研发经验、雄厚的研发经费、良好的市场认可度和品牌美誉度,使得低压电器的市场竞争非常激烈。因此,如何进一步提高我国低压电器的自主创新与研发水平,掌握关键的核心技术,增强产品的国际竞争力,促进低压电器事业的不断向前发展,实现产品技术上的超越、引领,成为低压电器领域的研究机构和生产企业所面临的重要问题。

在低压电器产品中,无论是从产值、产量,还是技术复杂程度上来看,作为配电电器的低压断路器无疑是最重要的,其性能在很大程度上反映了一个国家低压电器的设计与生产水平。根据国际电工委员会的IEC标准和我国的国家标准,低压断路器按使用类别划分为A类和B类两种。A类断路器在短路情况下、无明确指明具有选择性保护功能,B类断路器则明确指明具有选择性保护功能。低压断路器按结构又可以分为三大类:框架断路器(ACB)、塑壳断路器(MCCB)和微型断路器(MCB)。

在低压断路器小型化、智能化、高性能、节能环保的发展趋势下,如何缩短新产品上市周期,降低研发成本,提高产品性能,对市场需求的快速灵活反应成为生产企业的核心竞争力。传统的低压断路器设计,首先是通过调研确定初步设计方案,然后依靠简单的经验公式做产品的设计计算,并通过反复的样机制作和试验验证来最后确定设计方案,达到设计要求和性能,这种“经验设计+试验验证”的设计模式一方面设计周期长、经济性不高,更重要的是很难达到最优化设计。

针对这一问题,自 20 世纪 50 年代以来,人们就将数值计算应用于低压断路器的产品研发中,而“建模与仿真”也一直是低压电器领域的两个具有悠久历史的国际会议:IEEE Holm Conference on Electrical Contacts、International Conference on Electrical Contacts 的永恒主题之一。

操作机构、脱扣器和触头灭弧系统是低压断路器的主要组成部分,这三部分的性能及其之间的优化匹配在很大程度上决定了低压断路器的开断能力及运行可靠性,而开断能力是考核低压断路器产品的关键指标,运行可靠性是对低压断路器的根本要求,因此这也成为长期以来低压断路器建模仿真技术的研究重点。本书也正是重点介绍了操作机构的运动特性优化设计与寿命评估、不同结构形式的电磁脱扣器和热脱扣器保护特性优化设计、触头系统的电动稳定性和热动稳定性计算、电弧演变过程的数学建模与仿真、短路开断过程的仿真分析等几个方面的研究成果。

1.2 低压断路器的建模仿真技术发展概况

基于低压断路器建模仿真技术取得的长足进步,国际上各个主要公司纷纷建立并不断完善具有各自技术特点的专用仿真系统,并在新产品研发中得到了广泛应用。如 ABB 公司与德国德累斯顿技术大学自 20 世纪 50 年代就电器温度场仿真和热分析开展合作以来,一直在电器建模仿真领域与多个大学保持密切的科研合作关系,包括德国亚琛工业大学、瑞士苏黎世联邦理工学院、英国利物浦大学等,为 ABB 公司实现行业的技术领先提供了重要支撑;三菱电机在研发 WS-V 系列产品时,也对触头灭弧系统的电动力和压力、外壳的应力应变等进行了细致的仿真与对比分析,在产品小型化的同时有效实现了高性能。

我国在研发新一代低压断路器的过程中,也充分利用了相关的建模仿真技术,提高了设计的科学性、准确性,并有效地解决了产品设计过程中的技术难题,如双断点 MCCB 中双断点触头接触平衡与触头斥开后可靠卡住机构设计、操作机构疲劳寿命提升、可调磁脱扣器反力弹簧参数设计等问题。

从发展历史来看,我国在 20 世纪 70 年代末即开始有限元分析在电磁铁特性仿真和优化设计方面的研究和应用;随后在 80 年代后期,我国低压电器行业引进了国外著名的三维 CAD 软件,如 UG-II、Pro/E 等,极大地促进了行业的技术进步和快速发展;接着 90 年代以来,国际上著名工程仿真软件公司陆续推出了一系列商用仿真分析软件,如电磁场仿真方面有 ANSYS、Vector Field、Ansoft 等,流体动力学仿真软件有 Fluent、CFX、Phoenix 等,多体动力学仿真软件 ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems,机械系统动力学自动分析)等。基于这些商用软件,结合低压断路器的设计需求,西安交通大学低压电器科研组在陈德桂教授的领导下,通过紧密的产学研合作,理论联系实际,经过近 20 年的不懈努力,在很大程度上改变了我国低压电器行业“经验设计+试验验证”的产品设计模式,探索出了符合低压电器行业特点及我国实际需求的低压断路器数字化设计方法和技术,这对于我国低压电器行业的发展具有重要的意义和深远的影响。

值得一提的是,在这一过程中,西安交通大学低压电器科研组与时俱进、不断创新,结合研究生培养(包括在职工程硕士和全日制硕士生、博士生)、开办短期培训班等不同形式,为低压电器行业输送和培养了大量具有低压断路器建模仿真专门技术的人才,不懈致力于推动行业的技术进步。在研究生课程设置方面:20 世纪 90 年代起陈德桂教授就开设“电器现代设

计方法”，专门讲授电器优化设计方法及相关数值计算技术；后来结合低压电器学科方向的发展和自身科研工作的成果，自2006年起，在陈德桂教授的支持和鼓励下，李兴文将“电器现代设计方法”课程改为“软件设计及大型仿真计算系统应用”，进一步突出大型仿真计算系统在低压电器产品优化设计中的应用以及相关二次开发技术；经过几年的教学实践，面对我国低压电器行业发展的新阶段和电器方向研究生培养的新需求，并结合对国际上电器科学与技术发展趋势的理解，在2013年，李兴文又将“软件设计及大型仿真计算系统应用”课程调整为“电器新技术”，在讲授低压电器建模仿真的同时，进一步加入气体开关电弧基础理论（包括低压空气电弧和高压SF₆电弧）、低压电器的先进测试技术、新型电器等相关内容。

自2010年以来，在已有工作的基础上，国内外在低压断路器的建模仿真技术方面取得的重要进展如下：

1) 电弧磁流体动力学建模仿真取得突破。可计算数十千安短路电流、双断点结构等条件下电弧动态演变过程，并可考虑电弧与非线性铁磁栅片、产气材料、电极相互作用的影响，通过与实验结果对比，在很大程度上具备了分析“多组分、强电流、复杂结构”低压断路器电弧开断过程的能力，基本满足了工程设计的需求。

2) 完善了操作机构疲劳寿命评估与优化技术。在实现了操作机构不同操作条件下的动态特性仿真分析的基础上，基于多物理场耦合仿真技术及多个大型商用仿真软件的协同，通过多个部件的同时“柔性化”，分析各部件在操作机构高速运动过程中的应力应变特性，并可考虑材料、电动力等因素的影响，通过在ACB和双断点MCCB操作机构寿命评估与工程优化的实践表明，该技术是有效的。

3) 完善了短时耐受电流能力的计算方法。建立了描述触头间接触电阻动态变化的模型，可考虑相间对各并联支路电流分布的作用、扭转与侧偏力矩的作用及其对电动稳定性和热动稳定性的影响，并通过实验一方面验证了方法的有效性，另一方面也阐明了短时耐受电流过程中触头间不稳定电接触状态的演变规律。

4) 建立了可调磁脱扣器反力弹簧参数的设计方法。基于多物理场耦合仿真技术，根据不同的保护特性要求，考虑弹簧分散性的影响，实现了最优反力弹簧参数的选取，满足了可调磁脱扣器、产品系列化设计的要求，已在多个新产品研发中得到成功应用。

5) 建立了电磁场-温度场-气流场耦合作用下的发热分析方法。与传统的温度场有限元计算方法相比，该方法避免了基于经验、设置部件表面散热系数带来的计算误差和不确定性，可直接采用导体、绝缘件、空气等的物性参数来描述传热过程，为低压断路器及其系统的热分析提供了有效手段。

应该指出：面向新能源发电系统、低压直流电网发展等对低压断路器不断提出的新的、更高的要求，在低压断路器的建模仿真方面仍有大量的工作需要去研究，如：

- 1) 低压断路器与系统相互作用的建模方法与仿真技术；
- 2) 低压断路器全寿命周期的建模与先进分析技术；
- 3) 低压断路器弧后电击穿、热击穿过程建模方法与评估技术；
- 4) 更高电压、非工频条件下高性能低压断路器的优化设计技术；
- 5) 混合式直流断路器开断特性的分析方法；
- 6) 交、直流故障电弧的数学模型及其在监测系统中的应用技术。

第2章 低压断路器操作机构动态特性的仿真与优化设计

断路器操作机构的动作速度与断路器开断特性有很大关系，断路器操作机构动作速度越快，电弧拉长得越快，使电弧越容易进入栅片，电弧停滞时间也越短，提高了电弧电压的增长速度，对限流断路器来说，操作机构动作越快，有利于动触头斥开过程与机构动作的合理配合，防止发生动触头跌落和熔焊现象。这一章将介绍塑壳断路器和框架断路器操作机构的刚体动力学仿真分析与以动作速度最快为目标的优化设计。

2.1 低压塑壳断路器操作机构的仿真建模

2.1.1 低压塑壳断路器操作机构简介

首先取一额定电流为 250A 某型号低压限流式塑壳断路器（Moulded Case Circuit Breaker, MCCB）为例来说明操作机构的工作原理，如图 2-1 所示。其操作机构是典型的五连杆机构，其分合闸过程是一个瞬间的动作过程，包含高速的碰撞，涉及因素较多，故要精确建模。机构的结构简图如图 2-2 所示，它由触头支架 f、下连杆 g、上连杆 h、跳扣 k、锁扣 m、操作手柄 1 和分断弹簧 2 等部分组成。动触头转轴 O 上的扭簧（图上未注明）约束了动导电杆和触头支架的相对运动。当处于图示合闸位置时，分断弹簧 2 虽有贮能，但因上连杆 g 和下连杆 h 处于挺直状态（死区位置），C 点固定不动，下连杆 g、上连杆 h、触头支架 f 和机构构成四连杆机构，处于稳定静止状态，此时触头完全闭合。手动分闸时，分断弹簧随着手柄的转动被伸长贮能，当弹簧力的作用线与上连杆重合时，处于最大位能状态，一旦超过上连杆，B 点向左运动脱离死区，触头支架被下连杆迅速上提，绕主轴 O_1 转动，从而带动动导电杆和其上的动触头向上运动而分断。在短路电流到来而脱扣器未动作之前，如果电动斥力足够克服触头预压力和触头重力，动触头可被斥开一定的角度，当短路电流引起锁扣 m 转动，在分断弹簧作用下，跳扣 k 绕 O_2 轴顺时针转动，C 点成为活动点，同时上连杆 g、下连杆 h 脱离死区，于是变成五连杆机构。因为五连杆机构有两个自由度，触头继续分断，同手柄位置无关。

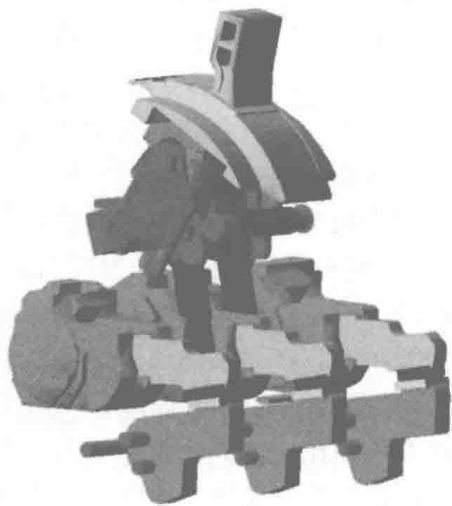


图 2-1 仿真模型图

2.1.2 操作机构仿真模型的建立

建立操作机构仿真模型的最简便的方法是从常用的三维实体造型软件中导入，如从

SolidWorks、UG 和 Pro/E 等建立的实体模型完整地导入到 ADAMS 软件，中间文件格式最好的是 Parasolid，以 *.x_t 和 *.xmt_txt 文件名导入，断路器操作机构的结构比较复杂。考虑到所关心的问题和仿真的方便，对其作适当简化，将从 UG 等三维软件导入的低压塑壳断路器操作机构和触头系统的模型进行了删减，在 ADAMS/View 中重新建立了关键构件的模型，其主要由连杆机构组成。只要仿真构件几何形体的质量、质心位置、惯性矩和惯性积同实际构件相同，仿真结果是等价的。样机约束的正确施加很重要，在建模时主要用到连杆和轴之间的转动约束、两构件之间的接触约束、轴和地之间的固定约束等。以断路器中跳扣的轴为例，它和地之间是固定约束，和跳扣之间是转动约束，同时和上连杆有接触约束。在施加约束前必须对构件之间的连接关系很清楚，才能保证在仿真时系统以预想的方式运动，建模过程所用到的一些重要参数见表 2-1。

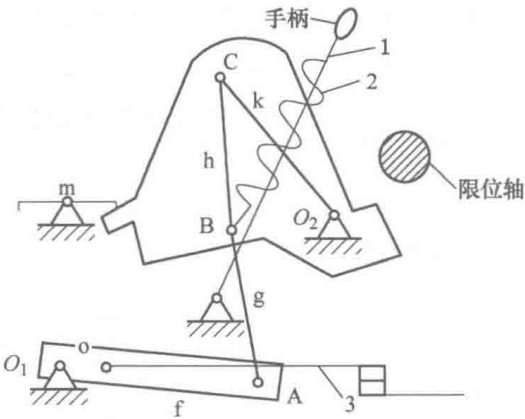


图 2-2 MCCB 操作机构结构简图
1—手柄杠杆 2—分断弹簧 3—动导电杆
f—触头支架 g—下连杆 h—上连杆
k—跳扣 m—锁扣

表 2-1 ADAMS 建模过程中用到的参数值

主弹簧 (分断弹簧)	刚度系数/(N/mm)	动触头扭簧	合闸位置变形角度/deg(°) ①
	自由长度/mm		合闸位置扭矩/(N·mm)
	合闸位置拉力/N		刚度系数/(N·mm)
	分闸位置拉力/N		初始角度/deg
动触头扭簧	刚度系数/(N/mm)	静触头扭簧(对静触头也可斥开的面斥触头系统)	合闸位置变形角度/deg
	初始角度/deg		合闸位置扭矩/(N·mm)

① 该符号是在软件中默认为 deg，仿真图同此。

建模过程中应注意的关键之处：

- 1) 动力的合理施加 在短路故障发生后，短路电流流经低压断路器时，触发其脱扣机构，机构在此分闸过程的驱动力主要来自于分断弹簧，其输出特性决定了分闸过程主要参数的值（如刚分速度、平均分闸速度、分闸时间等）。由于弹簧的输出力特性由刚度系数和预作用力以及预作用力下的长度决定，因此只要准确定义这三个参数即可。
- 2) 反力的合理施加 决定断路器分合闸特性的不仅有驱动力的大小，还与机构中存在的众多的反力有关。这其中包括动触头重力、触头弹簧的反力以及各运动部件之间的摩擦力等。
- 3) 约束关系 操作机构中的约束关系包括固定约束（fixed joint）、转动约束（revolute joint）和碰撞（contact）等。约束关系的添加要充分考虑实际操作机构中可能存在的约束，遗漏任何一个约束关系都会严重影响到输出结果。

在添加约束时，应逐步对构件施加各种约束，并经常对施加的约束进行试验，保证没有约束错误，尤其要注意选择对象的顺序和约束方向是否正确，错误的约束方向可以导致某些自由度没有被约束而使运动混乱；另外，尽量用一个运动副来完成所需的约束，如果使用多

个，每个运动副实现的自由度约束有可能重复，可能会导致无法预料的结果。

对于单断点塑壳断路器，尽管不同型号的断路器有着不一样的机构，但是有些约束一般都会用到，见表 2-2。

表 2-2 单断点塑壳断路器约束关系类型（参见图 2-2）

约 束 关 系	连接构件 1 名称	连接构件 2 名称	作 用
弹簧约束	手柄杠杆(1)	下连杆的连接轴(B)	主拉力
	动触头转轴(0)	动导电杆(3)	触头压力
碰撞约束	动导电杆(3)	主轴	限位
	动导电杆(3)	灭弧室或其他构件	限位
	动触片	静触片	接触压力
	手柄杠杆(1)	跳扣(K)或其他构件	限位
固定约束	动导电杆(3)	动触片	固定
	静触片	地	固定
转动约束	主轴	地	转动

另外，在单断点塑壳断路器中一般都会有一些固定的构件，对于这些构件，添加约束关系也有一定的规律，见表 2-3。

表 2-3 塑壳断路器某些构件的约束关系

构 件 名 称	约 束 关 系	被连接构件	作 用
手柄杠杆	转动约束	地	转动
	固定约束	手柄	固定
	弹簧	上下连杆之间的轴 B	主拉力
	碰撞约束	跳扣或其他构件	限位
上连杆	转动约束	上下连杆之间的轴 B	转动
	转动约束	上连杆与跳扣之间的轴 C	转动
下连杆	转动约束	上下连杆之间的轴 B	转动
	转动约束	下连杆与主轴之间的轴 A	转动
主轴	转动约束	地	转动
	碰撞、扭簧、或转动	动导电杆	
	固定约束	下连杆与主轴之间的轴 A	固定
跳扣	转动约束	固定于地的轴 O ₂	转动
	碰撞约束	上下连杆之间的轴 B 或其他构件	限位
	碰撞约束	手柄杠杆	限位
动导电杆	转动、弹簧、碰撞	主轴	
	碰撞约束	灭弧室或其他构件	限位
	固定约束	其他,如动触片	固定

在以上两个表中,仅是针对一些共性的约束进行了归纳,作为添加约束的一种参考,对于不同的断路器,还应该具体问题具体分析。

4) 仿真过程的控制 考虑到仿真过程的方便性以及仿真结果的直观性,结合操作机构运动特点,应对断路器分合闸过程分别建模,分闸过程的起始时刻对应三相触头处于闭合状态,合闸过程的起始时刻对应三相触头分开状态。在 ADAMS 软件中,有交互式仿真 (Interactive Simulation) 和脚本仿真 (Scripted Simulation Simulation) 两种方法,为了实现对仿真过程的控制,需要添加传感器 (sensor),若单纯控制仿真过程的自动终止,采用交互式仿真,则可简单利用仿真输入菜单下拉列表框中终止时间 (End Time) 来控制,在短路脱扣条件下,额定电流 630A 以下的塑壳断路器的机构动作时间一般在 10ms 以内,所以可设仿真终止时间为 10~12ms。在计及电动斥力作用时,需采用脚本控制仿真来启动或停止执行仿真过程中的电动力的施加。

2.2 单断点塑壳断路器操作机构的仿真分析

2.2.1 单断点塑壳断路器操作机构动态特性的仿真

首先进行手动合闸过程的仿真,以图 2-1 的塑壳断路器为研究对象,建立三相触头处于分开状态的仿真模型,如图 2-3 所示,为了进行手动合闸,仿真时要防止跳扣动作,需在跳扣与地之间加一固定约束,其次在手柄上加上操作力,考虑对 250A 的断路器,一般操作力在 40~60N 之间,可以一个较小的值开始,逐步增加,直至机构动作为止,事先建立主轴转角和手柄操作力的测量,通过仿真可获得机构刚能动作时这两者随时间的变化曲线,如图 2-4 所示,图中实线为主轴转角变化 (MEA_ANGLE_CONTACT),虚线为操作力变化 (SFORCE_7_MEA_1),从图中可见,使机构动作的最小手柄操作力为 56N。

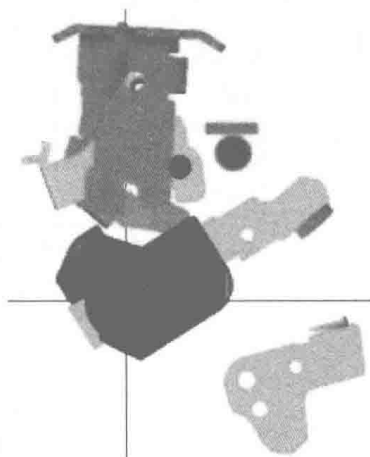


图 2-3 分闸位置的模型

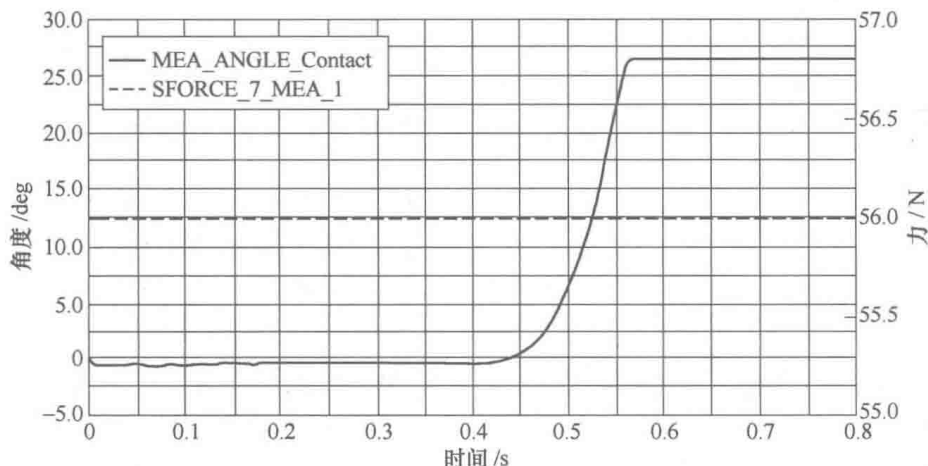


图 2-4 断路器合闸过程与操作力的确定

分闸过程的仿真要建立三相触头处于合闸位置的模型，如图 2-3 所示，分闸过程可由两种操作来实现，一种是依靠脱扣器，另一种是由手柄操作，后者仿真过程类似手动合闸，为防止脱扣器动作要在跳扣与地之间建立固定约束，而由脱扣器动作则要去掉这一固定约束，让跳扣一开始就动作，图 2-5 为脱扣器动作的分闸过程仿真曲线，图中虚线为主轴转角与时间关系，实线为角速度随时间的变化曲线，在角速度曲线上可看到有两个突变点，分别为 t_1 和 t_2 ，当主轴旋转走到超程，即到达 t_1 瞬间，主轴开始接触动导电杆，并带动动导电杆向触头分断方向旋转，由于突然加了负载，因而转速在 t_1 有一个突降。当主轴转动到瞬间 t_2 ，跳扣 k 与其限位轴图 2-2 发生碰撞，跳扣 k 的运动被限制不再转动，此后 C 点成为固定点，机构运动从五连杆变为四连杆如图 2-6 所示。在瞬间 t_2 前，机构运动为由 O_1O_2 、k、h、g、f 构成的五连杆系统（图 2-6a），到 t_2 瞬间跳扣被限位轴限制，变成由 O_1C 、h、g、f 构成的四连杆系统（图 2-6b），四连杆系统的运动速度较五连杆慢，所以图上的速度曲线在瞬间 t_2 有一个降低。通常限位轴或限位挡块是和手柄杠杆连在一起，在 t_2 瞬间以后，当跳扣与限位轴或挡块接触后，在开断过程后期可依靠开断弹簧力，让手柄杠杆和固定在其上的手柄移动到中间位置，塑壳断路器手柄处于中间位置是指示断路器由于故障而脱扣。

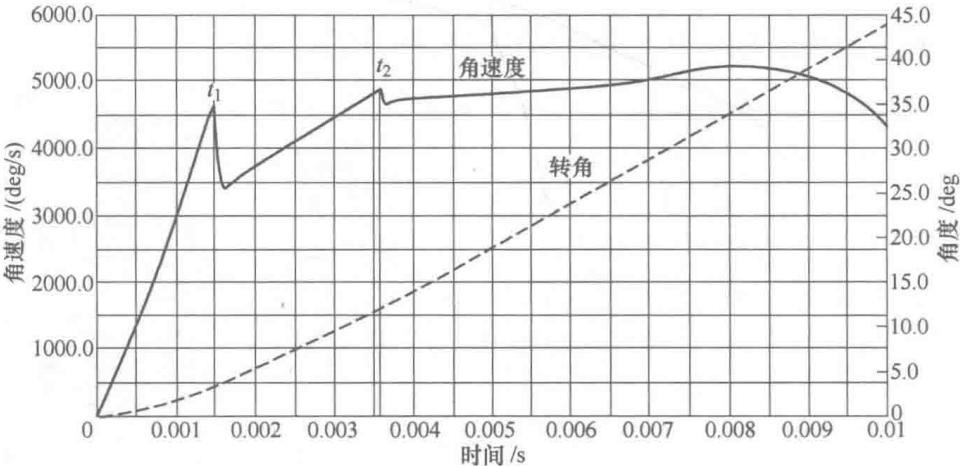


图 2-5 脱扣器动作的分闸过程仿真曲线

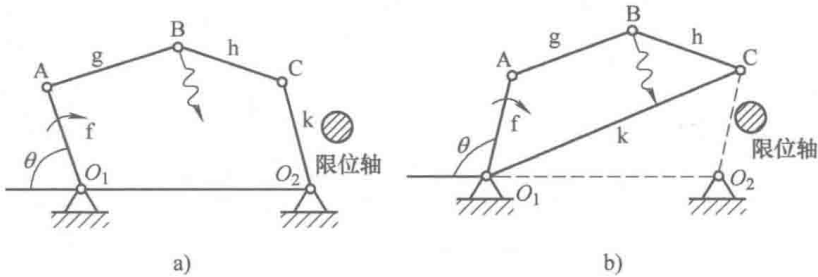


图 2-6 主轴转动过程中由五连杆到四连杆的转变

a) t_2 前为五连杆系统 b) t_2 后为四连杆系统

为了确定仿真模型是否符合实际情况，与塑壳断路器样机的物理特性是否一致。设计了一组实验，分别测试了断路器手动分合闸和脱扣分断过程中主轴角位移曲线。实验中采用 WDD35D4 型精密导电塑料角位移传感器测量角位移。测量角位移的实验线路如图 2-7 所示，角位移传感器是通过轴套与断路器触头支架的主轴相连的。

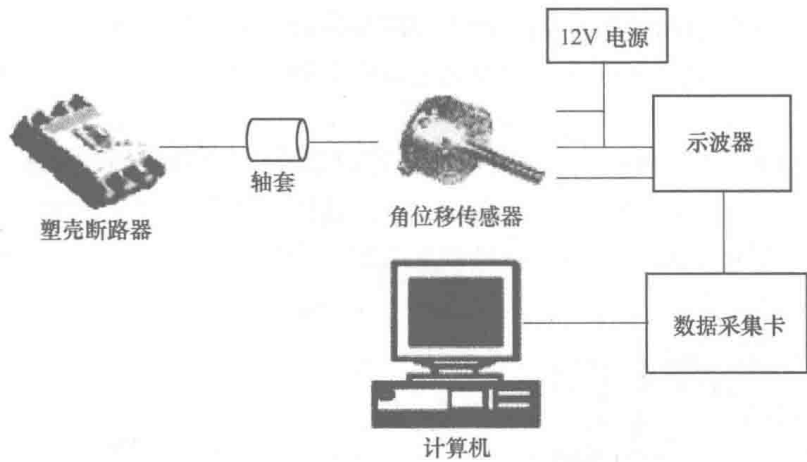


图 2-7 测量角位移的实验线路

图 2-8 给出了脱扣分闸过程触头支架主轴角度变化仿真与实测曲线对比结果，机构动作时间约为 9ms。从图 2-8 中可以看出，仿真模型的输出曲线与实际样机的输出曲线吻合得较好，证明了仿真模型的正确性。由于动触头臂到达最大角度与档块碰撞后，造成曲线最后阶段的起伏变化。考虑到我们关心的主要是断路器机构的分断速度，对触头臂与挡块碰撞后的运动不作深入研究。因此，以动触头臂运动到最大角度为仿真结束时刻。由图 2-8 可见仿真过程中考虑和不考虑摩擦力对仿真的准确性影响很大，轴间和有接触零部件之间的摩擦力与这些零部件加工工艺有关，要准确计算摩擦力，除依靠有关手册上介绍的摩擦系数和阻尼系数外，更重要的是通过大量实验来确定。

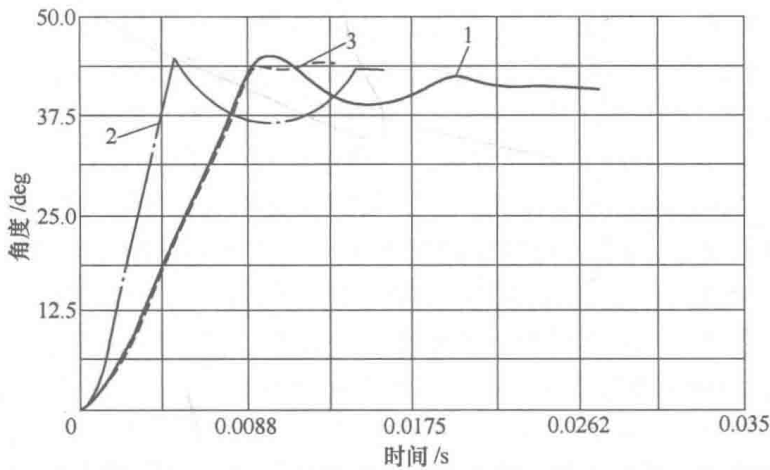


图 2-8 脱扣分闸过程中仿真与实测曲线的对比

1—实测曲线 2—不考虑摩擦力的仿真曲线 3—考虑主轴摩擦力后的仿真曲线

2.2.2 ADAMS 软件中触头参数的测量方法

低压断路器中关于触头的参数主要有三个：触头终压力、触头超程以及触头开距。触头终压力是指动触头和静触头完全闭合时，加在接触面上的压力，它的作用是保证触头通过额定工作电流时，触头温升不超过允许值以及通过规定的过载或短路电流时触头不发生熔焊；触头超程是指当触头完全闭合后，若将静触头移去，动触头所能移动的距离，它的作用主要