



国防科技图书出版基金

稳态加速度模拟试验设备 ——离心机概论与设计

Steady-State Acceleration Simulation Test Equipment

Centrifuge Conspectus and Design



贾普照 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

稳态加速度模拟试验设备

——离心机概论与设计

Steady - State Acceleration Simulation Test Equipment
—— Centrifuge Conspectus and Design

贾普照 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

稳态加速度模拟试验设备:离心机概论与设计/贾普照
编著. —北京:国防工业出版社,2013. 11

ISBN 978-7-118-09112-0

I. ①稳... II. ①贾... III. ①离心机 IV. ①
TQ051.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第235133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)
北京嘉恒彩色印刷责任有限公司
新华书店经售



*

开本 710×1000 1/16 印张 29¼ 字数 541 千字
2013年11月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价130.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金
第七届评审委员会组成人员

主任委员	王峰			
副主任委员	吴有生	蔡镭	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	贺明		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	陆军	芮筱亭
	李言荣	李德仁	李德毅	杨伟
	肖志力	吴宏鑫	张文栋	张信威
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

用于稳态加速度模拟试验的设备——离心机属于特种离心机,虽有百年历史半个多世纪发展,却因仅被狭窄领域应用而谓“特”;加之研制有一定难度,需要相当投入,数量既不能无也不会泛,谓之“少”。“特”、“少”二字使特种离心机作为专门技术存在着,作为学科却始终没有建立,甚至还没有一张名片——一本相关书籍来自我介绍。盖因长期以来特种离心机一向是以分散方式个别研发,随需随制,可用辄止,星星点点,断断续续,少了系统研究。

我国离心机研制已有五十多年历史,与世界发展基本同步,伴随“两弹一星”从航空航天到土工学界,从军口延及民口,研制成果已接近世界水平。中国空间技术研究院自20世纪50年代末到90年代中,成为我国特种离心机研制延续时间最长、门类较多、规模较大的一家单位,笔者有幸参与全过程而成为自己事业的专攻,直至退休。

笔者主持设计国家“七五”科技攻关项目——450gt 土工离心机之初的1988年,以其方案设计参与了国际土力学及基础工程学会离心机试验技术委员会年会,被选大会发言,遂从这个渠道长期跟踪土工离心机也已20余年,渐次接触到半个世纪的相关文献,尤其近年来伴随土工离心机,呈现“机”、“文”并茂空前繁荣的可喜景象,遂意识到土工离心机可作为研究特种离心机世界的载体;因为同样是重要发展方向的载人离心机,囿于它更为稀少且大多为商品及涉军保密等原因,有效文献凤毛麟角,此类设备目前只能端详广告图片揣摩解析,以其着墨甚难施展,这就是为什么本书是以航空航天离心机切入,以土工离心机为纲予以展述的原因之一。

从目前文献类别看,离心机“应用”远多于“设备”,导致这一现象故有一鸡可产多蛋,一台离心机可诞生众多应用研究有关;也与离心机长期属于非标准研制,缺乏专研及商家寡言不无关系。但作为学科应当含有设备和应用两方,二者相辅相成才佳,可现状——我们所讨论的特种离心机世存量仅约数百台,设备文献只占其一二成,与相对较多的离心模拟应用相比暂呈跛脚状。

就是纵观离心应用文献虽多,大抵也还在起步水平。比如土工离心应用,受塑性材料性态等因素制约,一时尚难进入精确量化阶段,试验误差尚未顾及,只在与数值分析和实测验证中摸索着前进;载人离心应用,受模拟条件和被试者差异影响,试验误差与人的容忍度混杂,“过试验”情况不可避免,如两轴载人离心

机的使用即是一例。可见,除满足眼下所需,试验应用的误差、精度、标准、规范等方面均有不少事情要去做,如此,必将牵动离心机、模型箱、检测设备等相关研究相应跟进;因此,作为基础的离心机似应带头有所整合,或走在应用前边做点什么,反促实验进展;或探讨自身技术如何与时俱进,使之更逼真更可靠;就是作为专业知识普及,为直接从事离心机研制和应用的人士或少数利用离心机技术延伸应用的其他行业,如动态飞行模拟器或其他武器和工业应用等方面专家,提供集中完整的特种离心机知识体系,使之尽快入门或助之与己需求衔接,如此等等,均与目前散乱少寡的离心机交流现状形成落差。

有鉴于此,笔者在进入古稀之年有了时间,遂滋生出做点继往开来或称铺路架桥式工作的强烈冲动,去帮助和缓解长期以来始终不断急切探求离心机知识,期盼一书在手尽知底细的人员等待与苦觅之辛。犹如笔者五十多年前刚叩离心机大门时,曾有过的饥渴与求知欲,虽然今非昔比,资料从无到有了一些,但四处散在既难搜集又较零碎,既得一二仍如摸象般恍恍然,深憾时过境迁半个世纪过去,后人仍如此饥渴、不便,着实让过来人承受了责无旁贷压力,于是,尝试着提起了笔。

但苦于无旧可循,不知从何下手。一团乱麻只好从头捋起:思绪从名称、单位开始及于术语、标准,这不仅可提纲挈领尚有拨乱反正之效,因为中外离心机界在“开步走”这里依然“乱象丛生”,许多地方还有规范化的必要;接着,逐一浏览洋洋洒洒设备,其数量虽不算多但百机百态,横跨几大洲绵延数十年,需要用功夫一一端详,寻觅其发生发展脉络,理清其合理发展方向,从一个国家(单位)到一国家(单位),从一台机器到一台机器,从别人工作到自己工作,这就形成了离心机的概论部分。至于离心机设计,只能根据个人是怎么干的,一一如实道来,不完整的补充,深入不够的研究,需学习的再学习,一方面铺垫了基本理论,一方面铺陈了构造思路,从计算到结构逐一分析比较,随时小结提醒,尽可能提供个人见解,使读者不仅知其然也可解其所以然。行文当然离不了琢磨文章架构、起承转合、前后关系、疏密浓淡等,终于弄出本书如此这般的一个框架出来。它一对离心机结构或构造进行了系统总结与研讨,二提出或列出了离心机设计可行之法,以供不同人士各取所需,也为同行提供了一个“三通一平”的学术基地或孵化地。

经过近七年努力,尽管内容尚显单薄浅陋,雕琢仍不到位,更多是囿于个人水平,无法满足所有读者期盼是肯定的。好在文中内容,客观资料不是精择改写就是经过反刍消化,然后精心按笔者思维重新吐纳;主观东西更是毫无保留悉数奉献,就算是对上世纪至今的离心机研制史和研制心得起个整理归纳作用吧。好在字字画画均可自力自为,修修改改也随心所欲,因此不厌其烦修来改去,绝不敢敷衍了事。至此,虽不成熟但确实筋疲力尽了,念兹乃倾心倾力所为,也就

不顾浅薄奉之于众。自信,除却水平不及,至少在主观态度和努力方面,不至于愧对读者,如此也就坦然了。此外,以愚之见,任何事物都有个从无到有的过程,作者仅是搭建一个框架而已,如合适,砖抛引玉,植梧引凤;若不合适,也算前车之鉴,供他人借鉴,另行改辙。

本书分为上下两篇,上篇——“离心机概论”乃认识篇或基础篇。亦分为二:前半部分从离心机家族开始进入稳态加速度模拟试验设备——特种离心机,先为特种离心机做了定位和分类;再从航空航天领域进入稳态加速度环境及其效应,为载人离心机做铺垫;模拟试验原理部分重点处理离心力与质量力模拟的力学关系,尝试着为土工离心模拟从另一个角度做一点基础理论支持;对现行标准的剖析是为离心机加速度数值和精度寻找依据,同时也指出标准落后于实践的问题,给出完善标准之拙见;对模拟试验方法的介绍自然就引出本书主角——离心机。

任何一个技术学科都不可能是无根之木,只有认真“承前”才能“继后”,才谈得上创新。离心机虽分物体、人体两用途,但其设计内容相近,只是侧重有所不同。而土工离心机有效负载和加速度更大,结构设计更具代表性,因此以土工离心机为主体去解说离心机,从技术上说也是最合适不过的,只需适时补进载人离心机不同内容即可。这样,本篇后一部分就是以土工离心机为纲,沿着历史的、地理的坐标,从离心机总体设计和主机结构这一重点出发,对世界范围内近五六十年离心机发展脉络和基本概貌,进行了全方位审视和逐一观察。一方面尽可能系统完整地予以归纳描述以传达信息,另一方面力求从中找出发展的规律性东西,吸取经验教训。为的是既对发展演变获得宏观了解,也对具体问题进行相关研究与探讨,实际上是对离心机相关历史财富的首次分析研究与思考归纳过程,也是笔者静下心来对全局进行的一次反刍式探讨与比较,可惜以前没有可能做到这一点,未能及时指导自己的设计,颇为遗憾。当然,拙文也仅意味着与读者一起共同探讨和切磋相关课题,本书只是笔者一份发言而已。

下篇“离心机设计”为实践篇。也分两部分:前半部偏重理论分析,首先给出离心机基本运动学和动力学计算方法;重点放在相对复杂一些的载人离心机运动分析上,利用举例和图形分析两种简洁方法,形象具体地给出单轴、双轴、三轴离心机的运动关系;同时也讨论了土工离心机附加直线运动时的基本力学状态;最后,还分析了离心机模拟的缺陷——固有误差问题,这些工作也是一次尝试,主要解决设计概念方面的宏观问题,当读者具体分析自己课题时还可借助现代设计方法进行精确计算与仿真研究。

后半部分,就离心机总体和主要部件的结构设计进行了个别和对比研究。提出离心机的关键指标——半径的决定方法;讨论了载人离心机惯性功率和土工离心机风阻功率等困难问题;强调了高加速度离心机转子的平衡,这部分也属

尝试,有一些不成熟和新展开的内容,提供读者研究思考;特别是对离心机总体布局及离心机主机等重要非标准部件,如转臂、主轴支撑、机械传动和驱动等的结构设计进行了详细讨论,这些部分无疑是任何一个离心机设计者进行创造性劳动可能发挥和张扬的领地,也是任何一台离心机独特品质的区别所在;最后,提供了一个国家“七五”科技攻关项目作为实例,供读者进行具体设计时参考。本篇主要目的是使设计者在理论与实际相结合条件下,获得设计整体和各单元设计细节的能力与技巧;再结合上篇通过一纵一横知识的融会贯通,不仅使读者全面具体地认识并掌握所研究对象,而且为读者自主创新奠定较宽厚的专业基础知识。无疑,这部分内容仍是一个处女地有待垦植,其中计算部分虽给出基本思路和同行或作者方法,但仍需共同探讨、继续充实完善;结构部分更是仁者见仁智者见智了,希望读者只把其视为参考,余下来就是自己的事情了。

本书内容既涉及广阔的离心机世界,读者从中可得到离心机的广度,也首次披露了作者四十多年来的重要离心机研制历程和相应成果的技术细节,同时融入个人点滴研制心得与体会,读者从而可获知笔者个体的深度,甚至可抚及笔者心声。但后者并不等于在着意推销,而是尽力为读者提供些许较深入较具体的技术思考而已,因为除却自己头脑可以挖掘和对别人公开资料尝试评介以外,其他研制者的技术深处,笔者是不可能了解到也不能擅自武断其细节的。何况技术创新更需要的是自己必须具备一定的触类旁通的本事,客观能获得某些启示就已不错了。

拙文在内容编排上力求条理化,行文迁字尽量摆脱僵化刻板,为使科技文章略显生气,有时不免触景生情,夹叙夹议一点。为叙述方便也为免除读者翻阅之苦,少量图片在上下篇间不免有所重复,以扮演不同角色,俾使各部分可自成体系。

需要说明的是,本书各部分内容繁简既取决于笔者业务涉猎也取决于掌握资料多寡,关于前者囿于专业所限,对离心机的电控、电测等部分肯定不够解渴,好在这部分的专业资料浩如烟海,而所需配套也大抵可获得商品或外协外购解决;关于后者一因资料累积工夫不到,二也实乃仍如沙漠觅水渴不及得,并非有意厚此薄彼。笔者宗旨是唯恐不精不细,对所搜集到的公开资料哪怕仅片言只语,都心怀欣喜,择其精华,充实于此。遗憾的是来自研制者和厂商的一手技术性资料还是太少,这是大家应该理解的。

最后,文中不够丰满以及本人力所不及的部分章节,热忱欢迎各界人士著文补遗,添砖加瓦,以最大热忱和最大可能来培植这片园地。当然,拙文的论述错误和谬误之处更是在所难免,衷心地欢迎读者朋友不吝指教。

限于篇幅,本书成书之际已忍痛将涉及研制过程、心得感悟等属于方法论和形而上的大部分内容删去,尽管那些恰恰曾是笔者最费心思、反复斟酌、流露心

声的一些活东西。看来,如何将干巴巴的技术类文章活跃起来仍然值得摸索,我看只要文理分科,二者尚一时难合。至于图片已采取大小有度或与文字混排,行文尽量减少并列、删除多余等方法予以删节。

在笔者近四十年离心机研制生涯中,前前后后与非常多的人士共同奋斗过,笔触所至,时不时就会闪现出与他们共事的情景来。可惜迄今为止,几乎所有的人都默默地淹没于历史烟云之中,随着岁月消逝渐渐淡出人们记忆。为此,笔者曾于2006年庆祝中国航天50周年之际,特意撰写了“四十年离心机研制技术志”一文,发表于中国空间技术研究院院网纪念专栏,以回忆曾经共事的同伴。在当时沸沸扬扬宣传英雄模范群星灿烂氛围中,该文表达了对连星星都算不上的一片云雾似的特别关注,说:“既是写‘志’将力求以全面真实为宗旨,同时,见物见人地记录那些虽非星光灿烂,但曾默默无闻、努力奋斗、做过奉献的相关人士,其中可能会有遗漏和个别不确之处,也许年轻人和年轻领导并不知道和认识他们,但那是的确存在过的鲜活历史和书写它们的人。如今,他们或调离或退休,个别已离世,甚至没有机会看到此文,本人均将虔诚地以陋文与文中人物共襄佳庆”。现在,本书更加具体地记录了他们在离心机领域的部分事迹,同样,笔者将以此书与他们共勉,共祝离心机事业兴旺发达!读者可在本书“附录”的节录中知道他们。

此外,在笔者从事离心机研制事业的各个阶段,都曾得到过相关领导的信任与支持,感谢他们为我提供了实干机会,这在谱写我个人人生篇章里十分关键,否则我怎么能有机会得到任务锻炼;于平头百姓丛中率先有了高级职称,古稀之年能成此书呢;更重要的是一生没有飘渺离地,似乎增添了一份摸爬滚打后的踏实感,这实际上也是一种精神斩获。他们最早如中国科学院581组二部[钱骥]主任,曾大胆信任一个初出茅庐的年轻人,将我国首两台航天离心机试制重担压在肩上,中途又接受并托付了大型物体离心机停产、改进设计工作,且爱屋及乌从母校引进新大学生组成课题组。[于庆田]前主任(后所长、院党委书记)在长达12年的我国超大型载人离心机任务中的充分信赖与共事挚情,实难忘怀,大功率全静压耦合转台就诞生在这种既压重担又很宽松的氛围之中。511所柯受权前所长,曾经大力扶持过离心机课题,如1985年803所离心机就是为巩固科研方向而赔钱进行的;1986年土工离心机任务,在人员组织上遇到困难,他毅然支持到哈工大引进新一批大学生从头干起,从而完成了国家“七五”科技攻关项目。但是,时耶命耶,本所离心机课题还是随着老人退休戛然而止,终结于上世纪尾端。尽管如此,笔者仍然对他们倾注于课题及本人的信赖与支持,深表谢意。

至于本书的诞生我必须感谢成书之前能在“航天器环境工程”杂志连续数年占据一隅得以发表的过程,这完全仰赖于前主编张润卿、副主编闫德葵的大力

支持与不断鼓励;加之他们经年累月仔细审阅文稿严格把关,对保证文章质量起到重要作用,编辑部其他同志的辛勤劳动也为文章增色良多,本人深深地感谢他们!可以说没有他们鼎力相助,笔者很难数年如一日地坚持下来,是他们督促了我,给了我希望才促成拙文的诞生;同时,那段发表期也为笔者听取读者反馈提供了宝贵机会。“航天器环境工程”的发表随着主编人退境迁也中途戛然而止,促使我不得不尽早寻找下一步出路。

困境之际,要感谢国防科技图书出版基金的评委们“慧眼识珠”,使我的拙作可以在诸多申请书稿中“脱颖而出”,获得资助。国家该类基金真是功德无量,它于功利市井之风弥漫之中,发挥了挽救有用物件不致淹没的功能,犹如慈善于扶贫济困般补充着社会不足。本人基金申请书还得到中国水利水电研究院陈祖煜院士和空军航空医学研究所由俊生研高工两位毫不迟疑的热情推荐,他们分别代表着我国土工模拟和航空仿真界同仁对离心机的期盼与支持。

最后,我也忘不了我的老伴朱文华高级工程师,除了曾经与她共同承担部分离心机设计工作外,在我多年驻厂研制各种离心机的时候,她长期孤身担起家庭和育子重担,从来没有让我产生过后顾之忧,我既往的“军功章”能没有她一半吗?就是写书这些年,同样古稀之年的她,继续承担全部家务不说,还要在我久坐伤身臂架双拐的数年期间,披星挂号,秉烛煎汤,数年如一日端茶递水,默默无闻地尽力保障着,使我不仅稿就,竟然还甩掉双拐,现如今如同好人一般,书中虽无她片语只言,但哪个字能没有她呢?

好了,谢谢所有各位,大家都是为着科学技术进步,为了国家离心机事业,让我们继续坚持不懈地努力吧!

编著者

2013年5月

目 录

上篇 离心机概论

第 1 章 特种离心机	1
1.1 离心机家族及其分类	1
1.1.1 按应用对象物理属性分类	2
1.1.2 按加速度水平分类	2
1.1.3 按应用范围分类	2
1.1.4 按工作场所分类	2
1.1.5 特种离心机分类	3
1.2 离心机家族发展简史	4
1.2.1 通用离心机	4
1.2.2 载人离心机	5
1.2.3 土工离心机	6
1.2.4 航空航天离心机	7
1.2.5 气体离心机	7
1.3 稳态加速度及其度量	8
1.3.1 稳态加速度	8
1.3.2 加速度度量	10
1.3.3 重力加速度	10
1.4 航天飞行器稳态加速度环境	11
1.4.1 发射过程	11
1.4.2 再入和回收过程	14
1.4.3 着陆与逃逸	15
1.5 飞机及导弹稳态加速度环境	15
1.5.1 飞机稳态加速度环境	16
1.5.2 固体火箭稳态加速度环境	16
1.6 稳态加速度环境效应	17
1.6.1 对航空航天器的效应	17
1.6.2 对飞行人员的效应	18
1.6.3 加速度方向	19

1.6.4	G 耐力	20
1.7	稳态加速度环境模拟原理与试验方法	21
1.7.1	惯性系与非惯性系	22
1.7.2	惯性力与引力	23
1.7.3	惯性质量与引力质量	24
1.7.4	离心加速度与引力加速度	25
1.7.5	相似律	25
1.7.6	火箭橇	27
1.7.7	离心机	28
1.8	稳态加速度环境试验及离心机标准剖析	31
1.8.1	电力行标 DL/T 5102—1999	32
1.8.2	国家计量规程 JJG 972—2002	33
1.8.3	国标 GB/T 5170.16—2005	33
1.8.4	标准对离心机设计的规范摘要	34
1.8.5	离心机标准工作刍议	35
	参考文献	37
第 2 章	苏英日意德离心机	39
2.1	苏联离心机	40
2.1.1	苏联启蒙土工离心机	41
2.1.2	苏联早期土工离心机	42
2.1.3	苏联现代土工离心机 АЗИС-2	47
2.1.4	苏联载人离心机	54
2.2	英国土工离心机	58
2.2.1	剑桥大学土工离心机	59
2.2.2	曼彻斯特大学土工离心机	63
2.3	日本离心机	65
2.3.1	PHRI 土工离心机	66
2.3.2	PWRI 土工离心机	67
2.3.3	日本航空自卫队载人离心机	69
2.4	意大利 ISMES 土工离心机	70
2.4.1	设备简介	70
2.4.2	问题探讨	72
2.5	德国鲁尔大学土工离心机	75
	参考文献	81

第3章 欧美其他国家离心机	82
3.1 法国土工离心机	83
3.1.1 CEA 离心机	83
3.1.2 LCPC 土工离心机	84
3.1.3 法国商品离心机	91
3.2 荷兰土工离心机	98
3.2.1 Delft Geotechnics 离心机	98
3.2.2 丹佛技术大学小离心机	107
3.3 奥地利 AMST 载人离心机	108
3.4 美国离心机	111
3.4.1 美国国家土工离心机	111
3.4.2 科罗拉多大学土工离心机	116
3.4.3 Sandia 国家实验室航空航天离心机	118
3.4.4 NASA 加速度模拟试验设备	120
3.4.5 HEPG 空军研究实验室离心机	123
3.4.6 美国商品离心机	125
参考文献	131
第4章 中国离心机	133
4.1 中国离心机现状及前途	133
4.2 长江科学院土工离心机	135
4.3 中国工程物理研究院离心机	138
4.3.1 LJ 型物体离心机	140
4.3.2 TLJ 型土工离心机	142
4.4 中国直升机设计研究所离心机	151
4.4.1 土工离心机	151
4.4.2 载人离心机	154
4.5 香港科技大学离心机	156
4.6 中国空间技术研究院离心机	159
4.6.1 物体离心机	159
4.6.2 特大型人一物两用离心机	171
4.6.3 大型土工离心机	180
参考文献	181

下篇 离心机设计

第5章 离心机力学分析与特性	184
5.1 单轴转动离心机	185
5.1.1 单轴离心机运动学	185
5.1.2 单轴离心机动力学	188
5.2 双轴转动离心机	189
5.2.1 双轴离心机运动学	190
5.2.2 双轴离心机动态过程	192
5.3 三轴转动离心机	205
5.3.1 三轴离心机启动	206
5.3.2 座舱俯仰运动	211
5.3.3 座舱运动与科氏加速度	218
5.4 离心机附加振动台	220
5.4.1 附加单向振动	221
5.4.2 附加双向振动	223
5.4.3 振动台对离心机的影响小结	223
5.5 离心机基本特性	224
5.5.1 离心机加速度场的不均匀性	224
5.5.2 离心机试验的固有误差	226
5.6 小结	228
5.6.1 离心机力学分析小结	228
5.6.2 离心机试验的力学本质	229
第6章 离心机总体设计计算	230
6.1 离心机总体设计与设计者	231
6.2 离心机基本设计参数	234
6.2.1 设计参数的形成	234
6.2.2 离心机设计指标	235
6.2.3 离心机设计半径	236
6.3 离心机驱动功率	242
6.3.1 摩擦功率	242
6.3.2 惯性功率	243
6.3.3 风阻功率	251
6.3.4 离心机驱动功率的工程计算	274
6.4 离心机转子平衡	275
6.4.1 平衡原理	276

6.4.2	不平衡的掌控	290
6.4.3	离心机转子平衡小结	298
	参考文献	299
第7章	离心机总体构造设计	301
7.1	离心机总体构造与布局	301
7.1.1	主轴系统与机械传动	301
7.1.2	上传动与下传动	304
7.1.3	吊篮甩动问题	306
7.1.4	对称臂与不对称臂	308
7.1.5	大电动机与小电动机	309
7.1.6	液压传动与电气传动	310
7.1.7	汇电环走线	311
7.2	离心机实验室	311
7.2.1	实验室构型	312
7.2.2	实验室温升	313
7.2.3	设备基础	314
	参考文献	315
第8章	离心机转子部件设计	316
8.1	离心机转臂	316
8.1.1	高转臂构型	317
8.1.2	扁平式转臂	327
8.1.3	箱形结构	333
8.1.4	等刚度臂	334
8.1.5	变刚度臂	335
8.1.6	摆动式转臂	335
8.1.7	一体化摆动转臂	337
8.1.8	自旋式转臂	338
8.1.9	转臂设计小结	338
8.2	离心机吊篮	341
8.2.1	试件吊篮	342
8.2.2	座舱	352
8.2.3	配重吊篮	355
8.2.4	吊篮设计小结	361
	参考文献	361
第9章	离心机传动与支撑部件设计	363
9.1	离心机驱动与传动	363