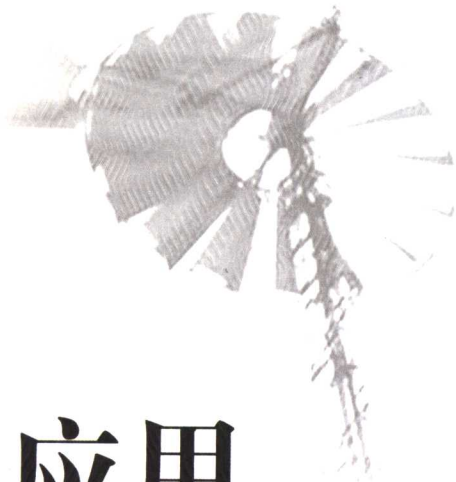


节能环保技术研究丛书

飞轮



储能技术及应用

汤双清 著

*F*lywheel Energy Storage
Technology and Its Application

华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

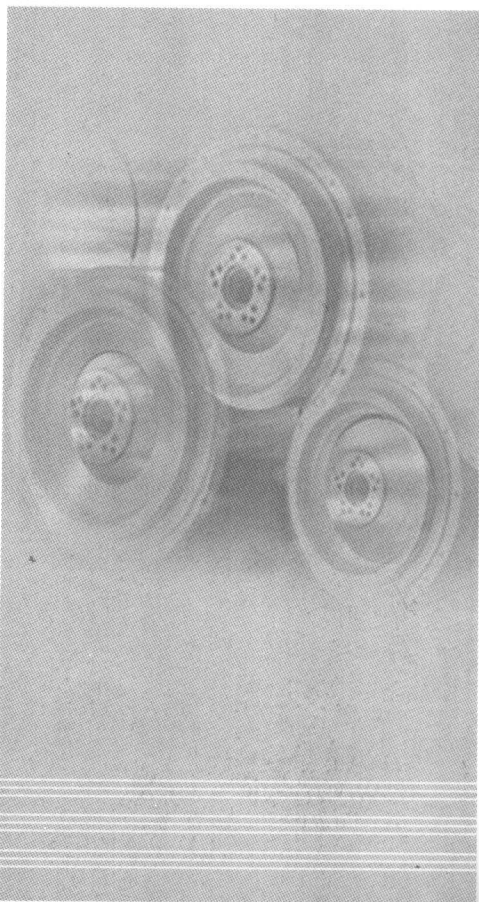
飞轮

储能技术及应用

汤双清 著

华中科技大学出版社

中国·武汉



图书在版编目(CIP)数据

飞轮储能技术及应用/汤双清 著. —武汉:华中科技大学出版社,2007年9月
ISBN 978-7-5609-4191-2

I. 飞… II. 汤… III. 飞轮-储能-系统-研究 IV. TH133.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第134855号

飞轮储能技术及应用

汤双清 著

策划编辑:刘 锦 万亚军

责任编辑:刘 勤

责任校对:代晓莺

封面设计:刘 卉

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉中远印务有限公司

开本:787mm×960mm 1/16

印张:10.75 插页:2

字数:171 000


版次:2007年9月第1版

印次:2007年9月第1次印刷

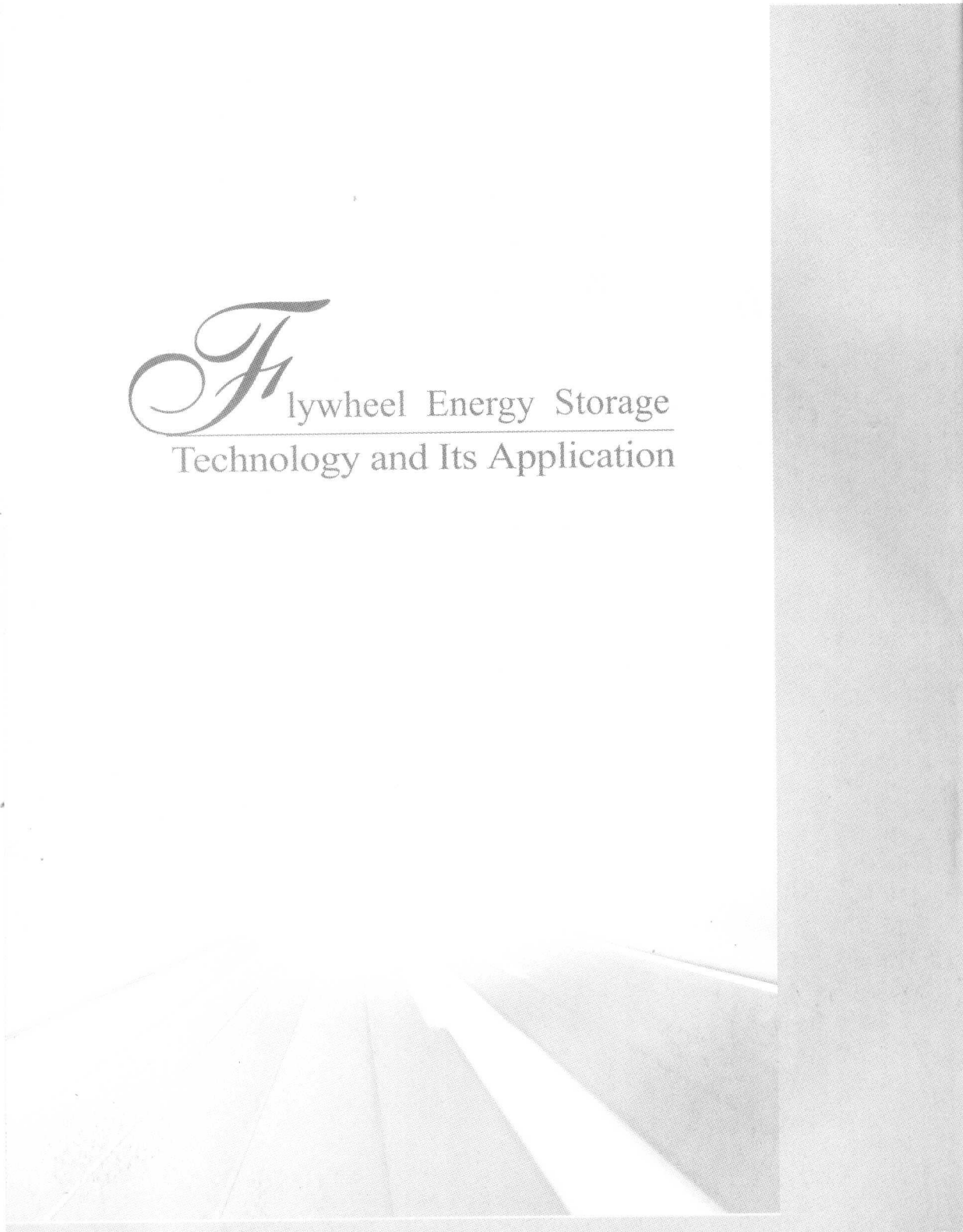
定价:22.80元

ISBN 978-7-5609-4191-2/TH·162

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)



lywheel Energy Storage
Technology and Its Application



内 容 提 要

本书是以作者多年来从事飞轮储能技术的研究成果,经过整理加工而成的。主要介绍了飞轮储能系统的发展历史与现状、飞轮电池的主要部件和一些关键技术。重点介绍了永磁磁力轴承悬浮力和刚度的计算理论、电动磁力轴承的原理和设计计算理论、飞轮电池能量转换理论以及飞轮储能系统在分布式发电系统中的应用。

本书可作为科研院所和高等学校从事飞轮相关技术与开发的工程技术人员参考书,也可作为从事磁力轴承和电机控制方面研究与开发的工程技术人员参考书。

作者简介



汤双清,男,1962年7月出生于湖北孝感。1984年本科毕业于原葛洲坝水电工程学院机械工程系,1989年2月硕士毕业于东南大学机械工程系,1999年9月至2000年2月在法国瓦朗谢纳大学做访问学者,2004年2月博士毕业于华中科技大学机械科学与工程学院。现为三峡大学教授,中国机械工程学会会员,湖北省机械工程学会青年分会常务理事兼副秘书长,湖北省金工教学委员会常务理事,湖北省机械原理教学委员会常务理事,三峡大学“151”人才学术带头人。

主要从事机械设计及理论方面的教学与科研工作,在机器人机构学和人工智能、计算机集成制造、加工过程数控、机电系统动态设计理论与方法、磁悬浮轴承及飞轮储能技术等领域有所成就。主持研究的课题及项目主要有:“工业机器人动力学参数识别”、“工业机器人的远、近程控制”、“新型磁力轴承悬浮机理研究”、“飞轮电池磁悬浮支承系统研究”、“超细长轴加工方案及制造设备研究”等项目。参与国家级研究项目有:国家自然科学基金3项,国家“九五”攀登计划项目子课题1项。在国内外刊物上发表论文近50篇,EI检索收录8篇。

序

能源工业是现代文明的支柱之一,是工业发展的主体,也是国民经济持续发展的基础,缺少能源,社会将很难发展,没有能源,人类将无法生存。

中国《能源发展“十一五”规划》日前公布。规划指出,“十一五”时期我国能源建设的总体安排是:有序发展煤炭;加快开发石油天然气;在保护环境和做好移民工作的前提下积极开发水电,优化发展火电,推进核电建设;大力发展可再生能源。适度加快“三西”煤炭、中西部和海域油气、西南水电资源的勘探开发,增加能源基地输出能力;优化开发东部煤炭和陆上油气资源,稳定生产能力,缓解能源运输压力。

“十一五”期间,我国将重点建设五大能源工程:能源基地建设工程、能源储运工程、石油替代工程、可再生能源产业化工程、新农村能源工程。

飞轮储能作为一种储能技术,早在蒸汽时代就有所应用,但直到 20 世纪 70 年代,由于石油禁运和天然气危机,美国能源部(DoE)和美国航空航天局(NASA)率先资助开发包括用于电动汽车的飞轮储能系统研究和用于卫星动量矩飞轮的磁悬浮支承系统的研究,那时才真正将飞轮作为一种单独的储能装置,而不是早期仅用于机器速度波动的调节。之后,对飞轮储能的研究如雨后春笋,方兴未艾。

飞轮储能系统也称飞轮电池,与化学电池相比,它的优点主要体现在:①储能密度高,瞬时功率大,功率密度甚至比汽油还高,因而在短时间内可以输出更大的能量,这非常有利于电磁炮的发射和电动汽车的快速启动;②在整个寿命周期内,不会因过充电或过放电而影响储能密度和使用寿命;③容易测量放电深度和剩余“电量”;④充电时间较短,一般在几分钟就可以将电池充满;⑤使用寿命只取决于飞轮电池中电子元器件的寿命,因此较长,一般可达 20 年左右;⑥能量转换效率高,一般可达 85%~95%,这意味着有更多可利用的能量,更少热耗散,而化学电池最高仅有 75%;⑦对温度不敏感,对环境十分友好(绝对绿色产品);⑧当它与某些装置组合使用时,如用于卫星上与卫星姿态控制结合在一起,使得它的优势更加明显。它的应用领域也非常广泛,已经涉及包括航空航天、国

防、汽车工业、电力产业、医疗和通信等在内的多个行业与领域。因此,研究与开发飞轮电池的市场前景广阔。

飞轮电池虽说不能“制造”能量,但它可以将零星的能量积聚起来使用,或将多余的能量储存起来在需要时再使用,而且还具备携带性,是一种储能更大的动力源,它的广泛使用将会引起电力工业的一场革命。

本书是作者多年来对飞轮储能技术研究的一种总结与提炼,难免还有一些没有考虑周全的地方。因此,希望这本书的问世能得到同行专家和广大读者的帮助、批评与指正。



2007年9月

前 言

飞轮储能既是一个古老的话题,也是一个当今比较热门的话题。随着社会的进步和经济的发展,人类对能源的需求与日俱增;能源危机已经初现端倪,它将严重制约人类社会的飞速发展,甚至可能危及人类的生存。

尽管采用飞轮储能技术并不能增加能源的供给,但它可以扩充能源的供应源,使原来不能直接应用的能源变得可以间接利用,从而可以从根本上缓解能源供应紧张的局面。此外,采用飞轮储能技术还可以改善电力供应质量,避免或减缓用电高峰拉闸限电的弊端,进而提高人们的生活质量。

飞轮储能技术应用十分广泛,涉及卫星和空间站上的后备电源,多种重要设备(如计算机、通信系统、医疗设备等)的不间断电源(UPS),电动汽车、分布式发电、运载火箭和电磁炮等的瞬时大功率动力供应源,电网负载调节、脉冲动力设备等。

飞轮储能技术涉及多种学科与技术,主要包括:机械科学、电气科学、磁学、控制科学和材料科学等多学科,以及复合材料的成型与制造技术、高矫顽力稀土永磁材料技术、磁悬浮技术、传感技术、用于VVVF(变压变频)的电力电子技术、高速双向电动机/发电机技术等关键技术。

为了让更多的读者了解飞轮储能技术,为努力营造一个节约型的和谐社会尽微薄之力,作者将近年来研究的成果经过整理和加工编写成这本专著,供从事飞轮储能研究与开发的工程技术人员参考。

限于作者的水平,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

著 者

2007年4月于三峡大学

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 飞轮电池的工作原理与应用领域	(2)
1.2.1 飞轮电池的组成与工作原理	(2)
1.2.2 飞轮电池的应用领域	(4)
1.3 国内外飞轮储能技术的发展概况	(5)
1.3.1 磁力轴承研究现状	(6)
1.3.2 飞轮研究现状	(10)
1.3.3 飞轮电池辅件分析	(14)
1.3.4 飞轮电池其他研究热点	(16)
1.4 飞轮储能技术的发展机遇和展望.....	(17)
1.5 本书各章简介.....	(18)
第 2 章 飞轮电池转子的支承、驱动和控制方案	(20)
2.1 飞轮电池系统结构方案.....	(21)
2.2 组合磁悬浮支承系统方案的拟定.....	(22)
2.2.1 支承飞轮转子的磁力轴承	(22)
2.2.2 组合磁悬浮的支承系统方案	(23)
2.3 集成式电动机/发电机的选型分析	(24)
2.3.1 飞轮电池所用电机	(24)
2.3.2 永磁同步电机数学模型	(27)
2.3.3 永磁同步电机的控制策略	(29)
2.4 电动机/发电机的控制方案拟定	(31)
本章小结	(32)
第 3 章 电动磁力轴承的悬浮机理	(34)
3.1 引言.....	(34)
3.2 电动磁力轴承的工作原理.....	(36)

3.3 转子的磁力分析·····	(38)
3.3.1 导体环 1 所受电磁力分析 ·····	(39)
3.3.2 导体环 i 所受电磁力分析 ·····	(40)
3.3.3 转子的受力分析·····	(40)
3.3.4 最优的导体环数的确定 ·····	(41)
3.4 电动磁力轴承的稳定性分析·····	(42)
3.4.1 转子稳定运转条件的建立 ·····	(42)
3.4.2 系统稳定运转的最低速度和临界阻尼的确定 ·····	(46)
3.5 阻尼系统的设计·····	(46)
3.6 电动磁力轴承的可行性和特性分析·····	(48)
3.7 设计实例·····	(50)
本章小结 ·····	(51)
第 4 章 永磁体空间磁场的计算方法 ·····	(53)
4.1 引言·····	(53)
4.2 磁化磁体的物理计算模型·····	(54)
4.2.1 Maxwell 方程组及交界面条件·····	(54)
4.2.2 等效磁荷模型 ·····	(56)
4.2.3 等效电流模型 ·····	(59)
4.3 永磁体周围空间磁场计算的数值方法·····	(60)
4.3.1 稳恒电磁场问题的统一表示形式和对应的变分方程 ·····	(61)
4.3.2 等效磁荷模型对应的变分形式 ·····	(62)
4.3.3 等效电流模型对应的变分形式 ·····	(62)
4.3.4 变分问题的有限元法 ·····	(63)
4.3.5 轴对称问题的有限元格式 ·····	(65)
4.4 圆柱形永磁体空间磁场的计算实例·····	(67)
4.4.1 永磁体及周围空间求解域的几何建模与网格划分 ·····	(68)
4.4.2 对整个求解域的求解 ·····	(68)
本章小结 ·····	(70)
第 5 章 永磁轴承构形综合及其磁力和刚度的计算方法 ·····	(72)
5.1 引言·····	(72)
5.2 永磁轴承构形综合·····	(73)

5.3 永磁轴承悬浮力的计算理论	(76)
5.3.1 重要的数学关系推导	(76)
5.3.2 Maxwell 应力张量及其磁力计算公式	(77)
5.3.3 虚功原理对应的磁力计算公式	(79)
5.4 磁力计算的数值方法	(80)
5.4.1 Maxwell 力对应的数值方法	(80)
5.4.2 虚功力对应的有限元法	(81)
5.5 磁力轴承刚度计算的有限元法	(84)
5.6 永磁轴承应用实例分析	(85)
5.6.1 通用圆环形永磁体构成的永磁轴承特性分析	(85)
5.6.2 带锥面磁隙的永磁轴承特性分析	(88)
5.7 永磁轴承磁场和悬浮力的实验分析	(91)
5.7.1 永磁轴承的实验方案	(91)
5.7.2 永磁轴承磁场和悬浮力测试	(93)
5.7.3 测试结果分析	(96)
本章小结	(98)
第 6 章 飞轮电池能量转换原理与矢量控制	(100)
6.1 引言	(100)
6.2 飞轮电池能量转换方案	(100)
6.2.1 飞轮电池能量转换系统的要求	(100)
6.2.2 飞轮电池能量转换系统分析	(101)
6.3 PWM 变流器的工作原理分析	(103)
6.3.1 单相 PWM 变流器工作原理	(103)
6.3.2 三相电压型 PWM 变流器工作原理	(108)
6.4 PWM 变流器的数学模型	(111)
6.4.1 三相电压型 PWM 变流器的数学模型	(111)
6.4.2 基于虚拟磁链的 PWM 变流器数学模型	(115)
6.5 IGBT 模型和整流器的仿真模型	(118)
6.6 飞轮电池能量转换系统的矢量控制	(119)
6.6.1 电压空间矢量控制原理	(120)
6.6.2 开关作用时间与开关区间判断方法	(124)

6.6.3 开关逻辑作用顺序	(126)
本章小结	(127)
第7章 飞轮电池在分布式发电系统中的应用	(128)
7.1 引言	(128)
7.2 含有飞轮电池的太阳能发电站的系统控制结构	(129)
7.3 太阳能电池的工作原理、种类及选用	(131)
7.4 飞轮储能单元	(133)
7.5 动力系统的调节与控制	(135)
7.5.1 单相逆变器	(135)
7.5.2 三相整流/逆变器	(139)
7.6 系统仿真	(140)
本章小结	(144)
第8章 结语	(145)
8.1 全文总结	(145)
8.2 研究展望	(146)
参考文献	(148)

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

飞轮储能系统作为一种使能技术已经应用到包括航空航天、电动汽车、通信、医疗、电力等领域^[1]。

早在 20 世纪 70 年代,由于石油禁运和天然气危机,美国能源部(DoE)和美国航空航天局(NASA)率先资助开发包括用于电动汽车的飞轮储能系统的研究和用于卫星动量矩飞轮的磁悬浮支承系统的研究。之后,英、法、德、日等西方国家也相继投入大量的人力、物力进行飞轮电池的研究,而我国从 20 世纪 90 年代才开始进行这方面的研究。

飞轮储能系统又称飞轮电池或机电电池^[2],它已经成为电池行业一支新生的力量,并在很多方面有取代化学电池的趋势。与化学电池相比,飞轮电池的优势主要表现在:①储能密度高,瞬时功率大,功率密度甚至比汽油的还高^[3],因而在短时间内可以输出更大的能量,这非常有利于电磁炮的发射和电动汽车的快速启动;②在整个寿命周期内,不会因过充电或过放电而影响储能密度和使用寿命,而且飞轮也不会受到损害;③容易测量放电深度和剩余“电量”;④充电时间较短,一般在几分钟就可以将电池充满;⑤使用寿命主要取决于飞轮电池中电子元件的寿命,一般可达 20 年左右;⑥能量转换效率高,一般可达 85%~95%,这意味着有更多可利用的能量、更少热耗散,而化学电池的能量转换效率最高仅有 75%;⑦对温度不敏感,对环境十分友好(绝对绿色产品);⑧当它与某些其他装置组合使用时,如用于卫星上与卫星姿态控制装置结合在一起时,它的优势更加明显。

现代飞轮电池使用复合材料飞轮和主动、被动组合磁悬浮支承系统^[4]已实现飞轮转子转速达 60 000 r/min 以上,放电深度达 75%以上,可用能量密度大于 20 Wh/lb(44 W·h/kg)。而镍氢电池的能量密度仅有 5~6 W·h/lb(11~12 W·h/kg),放电最大深度不能超过 40%。总体来说,目前飞轮电池的可用

能量密度最低也在 $40 \text{ W} \cdot \text{h}/\text{kg}$ 以上,最高的已经达到 $944 \text{ W} \cdot \text{h}/\text{kg}$,可见它的优势是十分明显的。当它用于电动汽车上时^[5],使得现代汽车制造业者完全不必考虑汽车废气的排放,从而真正开创无废气排放汽车的历史。

不管飞轮电池应用于哪个领域,对飞轮电池的开发研究都会涉及以下几个方面的高新技术:

- 复合材料的成型与制造技术;
- 高矫顽力稀土永磁材料技术;
- 磁悬浮技术;
- 用于VVVF(变压变频)电机的电力电子技术;
- 高速双向电动机/发电机技术。

这些技术通过系统工程技术(包括系统结构仿真和分析)而被融合在一起。

尽管飞轮电池技术有了长足的进展,但由于它涉及机械科学与技术、电机学、电力电子技术、电磁学、传感技术与控制科学、材料科学等多学科诸方面的技术,所以到目前为止,国内外仍没有一套成熟的理论和设计方法指导飞轮储能系统的设计。即便在国外已有开发出的飞轮电池可供使用,但仍有诸多方面需要改善,而且价格昂贵。只有大幅降低其价格并提高其可靠性,才有大范围推广应用的可能。本书着重介绍作者这几年关于经济型飞轮电池的研究成果,使读者能更好地了解国内外飞轮电池的研究现状,也为有志于从事飞轮储能的读者提供研究参考。

1.2 飞轮电池的工作原理与应用领域

1.2.1 飞轮电池的组成与工作原理

1. 飞轮电池的组成

典型的飞轮储能系统一般是由三大主体、两个控制器和一些辅件所组成:①储能飞轮;②集成驱动的电动机/发电机;③磁悬浮支承系统;④磁力轴承控制器和电机变频调速控制器;⑤辅件(如着陆轴承、冷却系统、显示仪表、真空设备和安全容器等)。

图1.1所示为一种飞轮电池的结构简图^[6]。其中:1为飞轮;2为含有水冷却的径向磁轴承的定子;3为径向磁轴承;4为轴向磁轴承;5为含有水冷却的电

机定子;6 为电机内转子部分;7 为电机外转子部分;8 为真空壳体。

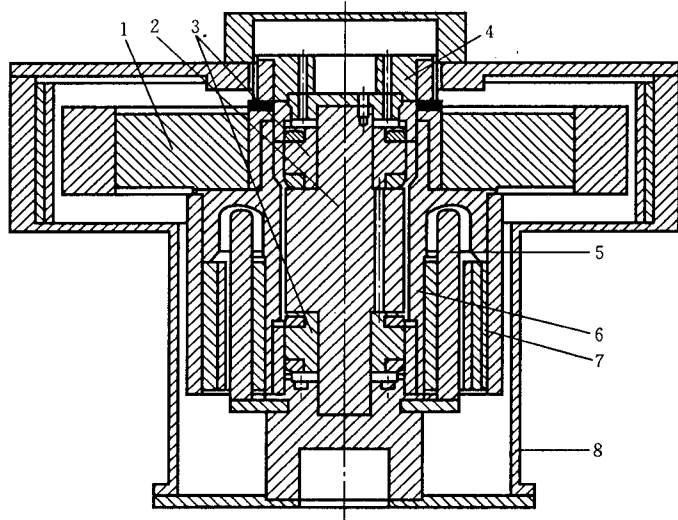


图 1.1 飞轮电池结构简图

1—飞轮;2—径向磁轴承的定子;3—径向磁轴承;4—轴向磁轴承;
5—电机定子;6—电机内转子部分;7—电机外转子部分;8—真空壳体

2. 飞轮电池的工作原理

飞轮电池类似于化学电池,它有以下两种工作模式。

(1) “充电”模式。

当飞轮电池充电器插头插入外部电源插座时,打开启动开关,电动机开始运转,吸收电能,使飞轮转子速度提升,直至达到额定转速时,由电机控制器切断与外界电源的连接。在整个充电过程中,电机作电动机用。

(2) “放电”模式。

当飞轮电池外接负载设备时,发电机开始工作,向外供电,飞轮转速下降,直至下降到最低转速时由电机控制器停止放电。在放电过程中,电机作为发电机使用。这两种工作模式全部由电机控制器负责完成。

飞轮转子在运动时由磁力轴承实现转子无接触支承,而着陆轴承则主要负责转子静止或存在较大的外部扰动时的辅助支承,避免飞轮转子与定子直接相碰而导致灾难性破坏。真空设备用来保持壳体内始终处于真空状态,减少转子运转的风耗。冷却系统则负责电机和磁悬浮轴承的冷却。安全容器用于避免一旦转子产生爆裂或定子与转子相碰时发生意外。显示仪表则用来显示剩余电量

和工作状态。

1.2.2 飞轮电池的应用领域

飞轮电池的应用十分广泛,但主要分为两大类型^{[1]~[7]}:一是作为储能用的,如卫星和空间站的电源,车辆的动力装置,各种重要设备(如计算机、通信系统、医疗设备等)的不间断电源(UPS)等;二是作为峰值动力用的,如电力系统峰值负载的调节,分布式发电系统中电网电力的波动调节,混合动力车辆负载的调节,运载火箭和电磁炮等的瞬时大功率动力供应源,脉冲动力设备等。

1. 在电动汽车和军用车辆上的应用

目前,飞轮储能系统可以单独或与其他动力装置一起混合用于电动汽车上,极大地改善汽车的动力性和经济性以及汽车尾气的排放状况^{[8]~[11]}。飞轮储能系统在军事车辆的脉动负载和运行负载调节方面也担负重要角色,如德克萨斯大学奥斯丁电动力学研究中心(UT-CEM)就为军用车辆开发了脉动负载和运行负载调节的飞轮储能系统^[12],该系统能储存 25MJ 的能量,能提供 5MW 的瞬时功率,可满足 14 t 级军用车辆的脉动动力要求。

2. 在卫星和航天器上的应用

Fare 公司、马里兰大学及受 NASA 资助的刘易斯(Lewis)研究中心共同开发了空心飞轮系统^{[13][14]},它是将马里兰大学的 500 W·h 的空心飞轮系统按比例缩小成 50 W·h 的空心飞轮系统。该系统用于近距离地球轨道(LEO)卫星和地球同步轨道(GEO)卫星的动力装置,取代了原先的化学电池。同时,它结合飞轮储能和卫星的姿态控制,使其优势更加明显^{[15][16]}。

3. 在电热化学炮、电磁炮上的应用

飞轮储能系统在电磁炮应用中具有明显优势,有一种 8 级逐级驱动的线性感应线圈发射炮能将 3 kg 的炮弹以 2 km/s 的速度发射^[17]。电热化学炮要求在 1~5 ms 内将脉动动力传到枪炮后膛,而由飞轮储能装置构成的脉冲盘交流发电机(PDA)就能适应这种要求^[18]。

4. 用于电力质量和电网负载调节

电力质量问题是一直困扰着电力工业的老大难问题。但随着 UPS 市场的发展壮大,各种重要的敏感设备(如计算机、通信设备和医疗设备等)受电网电力波动或突然的电力供应中断而造成的损失问题逐步得到了解决^[19]。作为飞轮储能系统,它完全可以担负起 UPS 的职能,而且电力供应质量可大大改善,供电