

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.10.010

飞轮储能系统轴系的优化设计研究*

徐登辉, 史涔激*, 张 健, 黄晓艳
(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对采用径向电磁轴承支承的飞轮储能系统中,工作转速会跨越临界转速而造成轴系所受应力强度过大及系统不稳定的问题,对储能飞轮的材料边缘线速度、所受弯曲应力,以及轴系的临界转速等方面进行了研究。对飞轮储能系统中飞轮本体的参数设计要求进行了归纳,提出了一种“以轻量化”为目的,以储能量要求、材料边缘线速度要求,轴系许用弯曲应力和工作转速与临界转速要求为约束条件的优化设计方案。研究表明,所得到的飞轮本体参数满足实际运行的需求,且为满足运行需求方案中质量最轻的方案。

关键词:飞轮储的系统;优化设计;模态分析;强度分析

中图分类号:TH133.7;TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)10-1320-05

Optimization of flywheel energy storage system on shafting

XV Deng-hui, SHI Cen-wei, ZHANG jian, HUANG Xiao-yan
(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problems that the stress intensity is too large and the system is instable caused by the working speed passing the critical speed in flywheel energy storage system (FESS) supported by active magnetic bearing, the material edge line speed, the bending stress, critical speed of shaft were studied. The parameter design requirements of flywheel in FESS were summarized, aiming at lightweight and with constraints of energy storage requirements, material edge line speed, bending force and critical speed requirements. An optimal design was proposed. The research results indicate that the parameters of the flywheel body can meet the needs of the actual operation and the scheme is the most lightweight one.

Key words: flywheel energy storage system; optimal design; modal analysis; strength analysis

0 引 言

在能源与环境问题日益严峻的今天,对于储能方式的要求也不断提高。在多种多样的工况要求下,对电池的储能密度、体积、容量、质量、效率等均有了更高的要求。相较于传统的化学电池,飞轮储能系统采用将能量转化为旋转动能的方式进行能量储存,它具有储能密度大、功率密度大、效率高、低污染等特点^[1]。在航空航天、电力系统调峰调压、车辆储能方面都有广泛的应用前景。飞轮储能的思想早在 20 世纪中叶就有人提出过设想,不过限于当时材料强度,轴承技术以

及充放电控制等因素,无法体现出其优势。直到 20 世纪 90 年代,随着高强度的碳纤维,玻璃纤维等材料使得飞轮边缘线速度可达 1 000 m/s,大大增加了飞轮储能的极限容量与储能密度;同时,随着半导体器件的普及与应用,电力电子装置不断升级,对于飞轮充放电的控制也提升到一个新的高度。随着磁悬浮、超导技术的发展,飞轮在高速下,支撑系统有了一个新的飞跃,配合真空技术,降低了摩擦损耗与风损,进一步提升了飞轮储能系统的效率^[2]。

本研究对储能飞轮的材料边缘线速度、所受弯曲应力轴系的临界转速等方面进行研究。

收稿日期:2015-04-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51407158)

作者简介:徐登辉(1990-)男,山东淄博人,主要从事永磁电机设计与控制方面的研究. E-mail:21310011@zju.edu.cn

通信联系人:史涔激,女,博士,副教授. E-mail:1159398275@qq.com

1 飞轮系统设计

飞轮储能的基本原理是将电能转化为飞轮旋转的动能,使用时,将存储的动能转化为电能输出。飞轮储能设计储能要求 4 MJ,输出脉冲功率为 200 kW,额定工作转速 30 000 r/min。其储能由动能公式(1)决定^[3]:

$$E_2 = E_{\max} \eta s = \frac{1}{2} J_p \omega_{fn}^2 \eta s \quad (1)$$

式中: E_{\max} —飞轮总储能; J_p —转动惯量; ω_{fn} —飞轮额定旋转角速度; E_2 —输出能量; η —电机及变换电路效率,选取 0.85; s —飞轮放电深度。

从式(1)可以看出,在放电机及变换电路效率和放电深度不变的情况下,提高飞轮储能可以从增加转动惯量和提高转速两个方面着手,而相对于增加转动惯量,提高转速更加有效。然而,随着转速的上升,飞轮本体的结构强度将面临更加严苛的要求。故需要对飞轮结构尺寸进行设计优化,充分发挥各种材料的性能,调和转速和强度的矛盾,使得飞轮在能够满足储能需求的情况下,达到轻量化的目标。

笔者设计飞轮结构为圆柱形,对于空心圆柱形结构^[4]:

$$J_p = \frac{1}{2} m (r_e^2 + r_i^2) \quad (2)$$

式中: m —空心圆柱质量, r_e —外半径, r_i —内半径。将式(1,2)联立,得:

$$E_2 = \sum \frac{1}{4} m_k (v_{ek}^2 + v_{ik}^2) \eta s \quad (3)$$

式中: m_k —第 k 层空心圆柱质量, v_{ek} —外环边缘线速度, v_{ik} —内环边缘线速度。

不同的材料会有其许用强度相对应的最大边缘线速度。根据式(3)可以看到在最大边缘线速度的约束下,质量越大,储能越高。因而飞轮材料选用结构为:最内层轴采用强度较低而密度较高的调制合金钢;之后采用强度较高,密度也较高的钛合金材料;最外层采用强度最高但密度较低的碳纤维进行包绕。充分利用各部分的优势,提高储能效率。材料参数如表 1 所示。

表 1 各层材料主要参数

	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	E/Pa	σ_b/Pa	μ
合金钢	7 850	2E11	7.5E8	0.3
钛合金	4 620	9.6E10	1.07E9	0.36

注: ρ, E, σ_b, μ —材料的密度,杨氏模量,抗拉强度,泊松比 4 个材料参数;碳纤维材料属性为各向异性,密度 1 700 kg/m³,环向弹性模量 13.9 GPa,径向弹性模量 1.158 GPa,环向抗拉强度 1.705 GPa,径向抗拉强度 0.037 2 GPa,泊松比 0.25。

在相当长的待机时间里,飞轮转子需要保持高转速状态以存储能量,这就需要飞轮的支撑系统具有低摩擦低损耗的特点从而提高飞轮储能的效率。磁轴承是一种新型高性能轴承。与传统滚珠轴承、滑动轴承以及油膜轴承相比,磁轴承不存在机械接触,转子可以达到很高的运转速度,具有机械磨损小、能耗低、噪声小、寿命长、无需润滑、无油污染等优点,特别适用高速、真空、超净等特殊环境^[5]。

飞轮系统采用立式结构,轮本体与额定转速转速 30 000 r/min 的高速永磁同步电机同轴相连。上、下两端各采用一套刚度为 1 MN/m 的径向主动电磁轴承固定,轴向采用永磁轴承卸载 80% 的重力,底端再辅以陶瓷轴承承载飞轮^[6]。飞轮系统基本结构如图 1 所示。

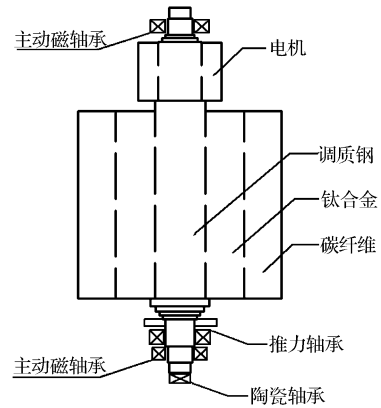


图 1 飞轮储能系统简图

2 储能飞轮方案设计

2.1 储能量要求

在工作转速、储能量、放电深度、能量变换效率均确定的情况下,根据式(3),储能量要求转化为飞轮本体转动惯量的要求,进一步转化为对于飞轮整体高度,轴粗,钛合金轮环内外径,碳纤维轮环内外径的约束。

2.2 材料承受离心应力要求

对于各向同性的材料即钛合金与钢材料来说,飞轮高速旋转时,材料所承受最大离心应力为^[7]:

$$\sigma = \frac{F_c}{A} = \frac{A \rho R^2 \omega^2}{A} = \rho v^2 \quad (4)$$

式中: σ —离心应力, F_c —离心力, A —截面积, ρ —材料密度, R —空心圆柱外半径, ω —角速度, v —外边缘线速度。

本研究根据钢材料与钛合金材料的材料许用应力以及取适当的安全系数,最终确定在飞轮储能系统中,钢材料的边缘线速度不能大于 200 m/s,钛合金材料的

边缘线速度不能大于 500 m/s。

对于各向异性的碳纤维来说,本研究采用厂家提供的 600 m/s 的最大边缘线速度作为约束条件。

2.3 轴强度要求

而对于飞轮系统来说,在升速到工作转速过程中,会越过低阶的临界转速,对轴的强度要求进一步升高。这种情况转子属于挠性转子,本研究根据 ISO1940 标准,选取精度等级 G2.5,挠性转子的原始不平衡量偏心为刚性允许的剩余不平衡量偏心的 10 倍,故取允许剩余不平衡度(不平衡偏心距) $\varepsilon_{\text{per}} = 0.8 \text{ g} \cdot \text{mm}/\text{kg} \times 10 = 8 \text{ g} \cdot \text{mm}/\text{kg}$ 。

在工作中,轴系重心处受到径向拉力:

$$F_t = m\varepsilon w^2 \quad (5)$$

式中: F_t , m , ε , w —轴系重心处所受径向拉力,轴系质量,剩余不平衡矩,旋转角速度。

按许用弯曲应力计算进行校核^[8]:

$$\sigma_{ca} = \frac{M_{ca}}{W} = \frac{\sqrt{M^2 + (\alpha T)^2}}{W} \leq [\sigma - 1]_b \quad (6)$$

式中: σ_{ca} —当量弯曲应力; M_{ca} —当量弯矩; W —形状系数,对于实心圆柱来说 $W = \pi D^3/32$ ^[8]; M —合成弯矩,取重心处承受拉力乘以较长一段力臂; T —转矩; α —折算系数,按脉动循环应力计算取值为 1; $[\sigma - 1]_b$ —对称循环需用应力, Cr40 取值为 70 MPa。

依据上述 3 个要求,本研究设计一组飞轮储能系统轴系尺寸参数,具体标注如图 2 所示。

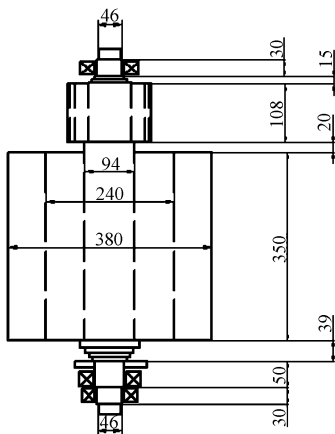


图 2 飞轮储能轴系尺寸标注

2.4 临界转速要求

对于高速运行下的转轴来说,由于不平衡偏心、安装公差、轴承刚度等因素,质心会偏离形心,高速旋转下引起转轴弯曲,在转轴弹性恢复力的作用下会产生振动。通过进行模态分析,确定转轴的固有频率和振型,避免在工作转速范围内出现共振是十分重要的^[9]。

高速旋转机械,对于在一阶临界转速以下工作的转子,应使工作转速 $n < 0.75n_1$; 对于在一阶临界转速以上工作的转子,应使工作转速满足 $1.4n_i < n < 0.7n_{i+1}$, 其中: n_i, n_{i+1} —相邻两阶临界转速。本研究选取放电深度 $s = 0.65$, 故工作转速要求在 17 700 r/min ~ 30 000 r/min 之间。根据转速与频率的对应关系,工作频率在 295 Hz ~ 500 Hz, 要求固有频率 f_i 不允许存在 200 Hz ~ 700 Hz 之间。

本研究在 ANSYS Workbench 环境下对倒角与过度部分进行简化后建模,用 modal 模块进行模态分析^[10-11]。在主动电磁轴承处设置为刚度系数为 1 MN/m。由于采用立式结构轴向扰动基本可以忽略,故本研究在永磁卸载轴承处设置柱形约束,将轴向位移约束为 0。

仿真分析后得到的固有频率与振型结果如图 3、图 4 及表 2 所示。

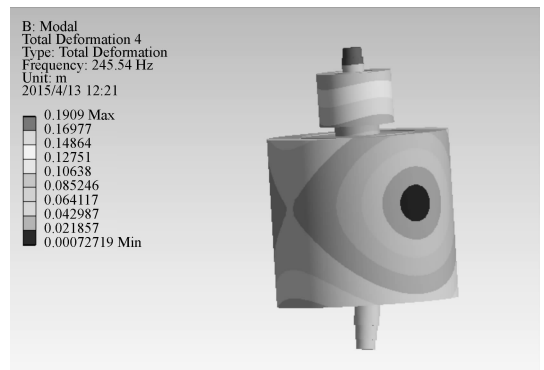


图 3 飞轮储能轴系一阶弯振模态

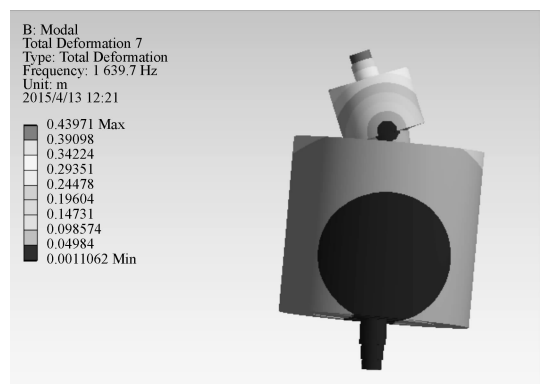


图 4 飞轮储能轴系二阶弯振模态

可以看到由于轴向采用的刚度较低的电磁轴承,前三阶模态为刚体模态;第二、三阶,第四、五阶,第七、八阶固有频率、振型相近,为振动方程重根,故可看作同一个模态。

由分析结果来看,在 200 ~ 700 之间存在一阶弯振的情况,不能在实际的系统中使用,故需要对设计方案进行优化改进。

表 2 轴系前 7 阶模态固有频率与振型

	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶	七阶
固有频率 f_i/Hz	10.745	13.452	13.454	245.54	246	1 489.6	1 639.7
临界转速 $n_i/r \cdot \text{min}^{-1}$	644.7	807.12	807.24	14 732.4	14 760	89 376	98 382
振型	柱形振动	径向平动	径向平动	一阶弯振	一阶弯振	轴向伸缩	二阶弯振

3 飞轮参数优化设计

优化设计的方法有两种:

(1)解析法。通过求解微分方程和极值,进而求出最小值;

(2)数值方法。借助与计算机和有限元,利用多个数值点,采用样条差值的方法形成一条连续可用的函数表达曲线或曲面,来近似数学意义上的极值求解。通过反复迭代逼近,求解出最小值。

飞轮的形状寻优要考虑飞轮的转动惯量、质量、临界转速和飞轮内部的应力分布,用解析法计算十分困难,故本研究选取数值方法进行优化^[12]。

对于电池而言,轻量化是极其重要的。就该案例来讲,在满足飞轮储能能量需求的情况下,质量最轻,也就意味着储能密度达到了最高。进一步如何选取各层材料的尺寸飞轮段的轴径,钛合金外径,碳纤维层外径,飞轮高度,使得满足工作要求的情况下质量最轻,成为本研究需要解决的问题。笔者根据上述问题得到优化设计模型。

(1)优化目标:

飞轮质量最小。

(2)优化参数:

飞轮段的轴径 r_s , 钛合金外径 r_T , 碳纤维层外径 r_C , 飞轮高度 h 。

(3)约束条件:

$$\begin{cases} J_p w_{fn}^2 \eta s > E_2 \\ r_c < 250, r_T < 160, 19 < r_s < 60 \\ \sigma_{ca} = M_{ca} = \frac{M_{ca}}{W} = \frac{\sqrt{M^2 + (\alpha T)^2}}{W} \leq [\sigma - 1]_b \\ 1.4f_i < f < 0.7f_{i+1} \end{cases} \quad (7)$$

依次对应于出储能量约束,最大边缘线速度约束,转轴强度约束,临界转速约束。

本研究利用 ANSYS Workbench 进行建模,采用 Design Exploration 功能下的 Goal Driven Optimization 模块进行优化求解,为了获取更多的实验数据,便于构建响应参数曲面,笔者在 Design of Experiments 中设置实验设计类型为 Custom + Sampling,设置样本总量为 200。参数中,设置飞轮段的轴径 r_s 取值范围为 45 mm ~ 60 mm,钛合金外径 r_T 取值范围为 90 mm ~ 160 mm 碳纤维层外径 r_C 取值范围为 160 mm ~ 250 mm 飞轮高度取值范围为 300 mm ~ 500 mm。

本研究进行试验样本的仿真求解,同时生成了响应曲面,得到了各个优化参数对于受约束参数的贡献度。

最后在优化模块中,本研究对于优化目标以及约束条件进行设置,得到了软件根据响应曲面选取的 3 个备选点如表 3 所示。其中的数据只给出了夹有工作转速下的两阶固有频率。

表 3 优化后得到的 3 组备选点数据

备选	r_s/mm	r_T/mm	r_C/mm	h/mm	f_5/Hz	f_6/Hz	σ_{ca}/MPa	E/MJ	m/kg
Candidate 1	53.845	91.831	183.12	484.4	198.38	1452.6	42.086	4.3	103.8
Candidate 2	49.845	91.548	179.93	487.73	197.15	1450.8	51.728	4.085	104.3
Candidate 3	54.745	94.526	180.07	498.8	191.75	1426.6	41.761	4.22	105.6

本研究从 3 个备选方案中选取一个方案作为最终的优化设计方案。方案 2 中,轴所受应力相对于其他两个方案有明显的上升,故淘汰方案 2。3 个方案中方案 1,3 比较相近,但方案 1 对于优化目标-飞轮轻量化优势更明显。故本研究选取方案 1 作为优化设计的最终方

案。由于优化设计模块中给出的输出数据结果是通过响应曲面拟合获得的,并非有限元仿真结果,本研究要将备选方案回代入原模型计算。考虑实际的加工精度,笔者根据备选 1 选取 54,92,183,485 回代入原模型计算。

最后优化前、后数据对比如表 4 所示。

表 4 优化前、后参数对比

	r_s/mm	r_T/mm	r_C/mm	h/mm	f_5/Hz	f_6/Hz	σ_{ca}/MPa	E/MJ	m/kg
优化前	47	120	190	300	246.63	1 490.9	47.39	4.19	102.5
优化后	54	92	183	485	196.89	1 447.3	41.83	4.3	103.9

4 优化结果分析

本研究通过表 4 中的数据对比可以看到,经过优

化设计后,工作过程中转速不会跨域临界转速并留有一定的裕量;轴系所承受的最大弯曲应力减少了 11.7%,储能量 2.6%,质量增加 1.3%,得到了满足工

作要求的最轻量飞轮轴系尺寸参数。

5 结束语

本研究采用 Workbench 有限元计算及目标驱动优化模块功能对影响飞轮储能运行因素进行了比较分析。笔者以飞轮本体尺寸参数为 Workbench 输入参数,以飞轮材料强度、轴所受应力、飞轮储能量、轴系固有频率、飞轮本体质量为输出参数,选取飞轮本体质量最轻作为优化目标,进行了优化仿真。优化结果使飞轮固有频率合理地避开了飞轮运行的转速范围,满足飞轮储能系统储能量要求,轴系所受应力在材料需用应力范围之内,同时具有轻量化的特点。

与优化前相比,该优化方法保证了运行的可靠性,提高了材料性能利用率,提高了整机市场竞争力,为飞轮储能系统轻量化研究提供了参考依据。

参考文献 (References) :

[1] 王江波. 高速飞轮储能系统的研究与实现[J]. 电气传动, 2014, 44(1) :26-30.

[2] 蒋书运, 卫海岗, 沈祖培. 飞轮储能技术研究的发展现状[J]. 太阳能学报, 2000(4) :427-433.

[3] 李文超, 沈祖培. 复合材料飞轮结构与储能密度[J]. 太阳能学报, 2001(1) :96-101.

[4] 张秀华, 李光喜, 王 琬. 高速储能飞轮转子的分析与设计[J]. 煤矿机械, 2012, 33(6) :57-59.

[5] 王 健, 戴兴建, 李奕良. 飞轮储能系统轴承技术研究新进展[J]. 机械工程师, 2008(4) :71-73.

[6] JIANG S, WANG H, WEN H. Flywheel energy storage system with a permanent magnet bearing and a pair of hybrid ceramic ball bearings[J]. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 2014, 28(12) :5043-5053.

[7] LIU H, JIANG J. Flywheel energy storage—An upswing technology for energy sustainability[J]. **Energy & Buildings**, 2007, 39(5) :599-604.

[8] 管胜荣. 转子发动机偏心轴结构设计及强度校核[J]. 小型内燃机与摩托车, 2010, 39(3) :48-51.

[9] 唐长亮. 20 kW/1 kWh 飞轮储能系统轴系动力学分析与试验研究[J]. 振动与冲击, 2013(1) :38-42.

[10] 崔小龙, 王泉中, 蒋身学. 基于 ANSYS 的机电产品包装箱底架模块分析与研究[J]. 包装与食品机械, 2014(6) :35-39.

[11] 李文逸, 宋以国, 李 翀. 基于 ANSYS 的复合材料飞轮系统模态分析[J]. 新技术新工艺, 2012(4) :4-6.

[12] 郭振宇. 基于差异演化算法的高速储能飞轮形状优化设计[J]. 吉林大学学报:工学版, 2008(1) :80-83.

[编辑:李 辉]

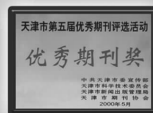
欢迎订阅《机械设计》杂志

国际标准刊号: ISSN 1001—2354

国内统一刊号: CN 12—1120 / TH

《机械设计》杂志是中国机械工程学会机械设计分会会刊、中文核心期刊、中国科技论文统计源期刊、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊, 学位与研究生教育指定中文重要期刊, 国内外公开发行。本刊已被“中国核心期刊(遴选)数据库”、“中国科技期刊精品数据库”、“中国期刊网”、“中国学术期刊(光盘版)”、“中国学术期刊综合评价数据库”等全文收录。《机械设计》的影响因子在同类科技期刊中名列前茅, 并多次荣获天津市一级期刊、天津市优秀期刊奖。本刊为月刊, 每月20日出版, A4开本, 每期传递信息量近20多万字。

本刊主要栏目: 设计领域综述(含动态、方针政策等); 专题论文(含设计方法、CAD、模块化设计、有限元、可靠性、失效分析、优化设计、并行设计、疲劳设计、反求工程、价值工程、人机工程、智能工程、专家系统、机构学、机械动力学、摩擦学、结构、传动、零部件、机电一体化等); 现代装备制造技术与实例分析(含专题论文中各种设计技术, 在实际应用中的实例分析与经验)。



国内总发行: 天津市邮政报刊发行局 邮发代号: 6—59

国外总发行: 中国国际图书贸易总公司 邮发代号: M7315

订购处: 国内各地邮局及本编辑部均可订购, 国外可与本社联系

单册订价: 12.5元, 全年订价: 150元

杂志社地址: 天津市河北区南口路40号

电话: (022)27343427

邮政编码: 300232

E-mail: jxsj@chinajournal.net.cn

欢迎订阅·欢迎投稿·欢迎刊登广告

本文引用格式:

徐登辉, 史潞微, 张 健, 等. 飞轮储能系统轴系的优化设计研究[J]. 机电工程, 2015, 32(10) :1320—1324.

XV Deng-hui, SHI Cen-wei, ZHANG jian, et al. Optimization of flywheel energy storage system on shafting[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(10) :1320—1324. 《机电工程》杂志: http://www.meem.com.cn