

文章编号:1000-582X(2013)02-115-06

双离合器双液力变矩器两体式柔性 飞轮特性分析及优化设计

宋立权¹,李 亮¹,周建东^{1,2},罗书明³,田宏艳³

(1. 重庆大学机械传动国家重点试验室 重庆 400044; 2. 重庆电子工程职业学院 重庆 401331;
3. 重庆光昊机械有限公司 重庆 401120)

摘 要:双离合器双液力变矩器两体式柔性飞轮是一种采用两个挠性体结构的新型飞轮,针对该新产品的开发,利用 Pro/Engineer 软件建立了该飞轮的三维实体模型,应用 ANSYS Workbench 软件对一体式飞轮和两体式飞轮分别进行了结构应力、结构模态和谐响应的对比分析,得出两体式飞轮是一种具有较好性能的结构形式,在此基础上,对柔性飞轮总成中挠性板的外形型线进行了结构形状优化,通过改变柔性板的柔度,实现所要求的动力学特性,经试验验证其分析方法的正确性和产品结构的合理性,并为该类产品的的设计提供了可行的设计与分析方法的依据。

关键词:飞轮;有限元方法;优化设计;Pro/Engineer

中图分类号:R319

文献标志码:A

Characteristic analysis and optimization design of dual-clutch transmission and double-turbine torque converter's two-body flexible flywheel

SONG Liqun¹, LI Liang¹, ZHOU Jiandong^{1,2}, LUO Shuming³, TIAN Hongyan³

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China;
3. Chongqing Guangda Industry Co. Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: Dual-clutch transmission and double-turbine torque converter's flexible flywheel is the newly developed type which has applied the design of a two-body flexplate. Corresponding 3D modeling of this new type of flywheel has been constructed by virtue of the software Pro/Engineer. Further comparative analysis has been studied in terms of structural stress, modal, and harmonic by the finite element software ANSYS Workbench, Through all these studies, the simulation results show that two-body flexible is a kind of the structure has a better performance. On this basis, the shape of the flexplate in the flywheel has been optimized with different flexibility to meet the requirement of dynamic characteristics, the test verifies the correctness of analytical approach and the rationality of product structure. A feasible design and practical analytical approach has been brought up through this study.

Key words: flywheel; finite element method ; optimal design; Pro/Engineer

收稿日期:2012-10-20

基金项目:教育部博导类博士点基金资助项目(20120191110003);重庆市科委重点科技攻关资助项目(CSTC, 2009AB616)

作者简介:宋立权(1952-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要研究方向为新型与机械精密传动与控制、机械系统动力学,(E-mail)lqsong5236@hotmail.com。

双离合变速器概念创始于 1933 年,出现在 Kegresses 的专利中。经过数十年的技术完善,2002 年大众汽车公司首次将双离合直接换挡变速器(DSG)应用到大众高尔夫大量产车上,实现了 DCT 的产品化^[1]。DCT 综合了液力机械自动变速器(AT)和电控机械自动变速器(AMT)的优点,传动效率高、结构简单、生产成本低,不仅保证了车辆的动力性和经济性,而且极大地改善了车辆运行的舒适性^[2]。

目前汽车双离合使用的柔性飞轮为一体式,即挠性盘在使用中既与曲轴尾端连接,又与液力变矩器或液力耦合器相连接,挠性盘在工作过程中承受从多方向的不同载荷,容易产生裂纹、变形、破碎等缺陷,影响使用功能和安全^[3]。这给挠性盘飞轮的设计和制造带来了很高的要求,为了满足高强度的使用要求,设计者只能在已有结构的基础上分别从应力^[4-5]和提高转动惯量^[6-7]角度,对飞轮进行结构优化设计,文献[8-9]则对飞轮进行了多目标的动态优化,但由于安装空间及结构布置的限制,造成了所获得的最优化参数往往不能实施。文献[10-11]利用光弹应力分析法,对某飞轮进行试验分析,文献对四缸内燃机曲轴-飞轮组进行了模态分析,且提出为保证发动机获得良好的动力学性能,还需在应力、模态分析基础上对其动力学特性进行优化。

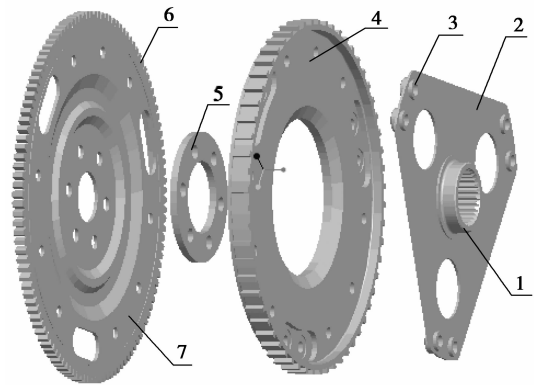
所研究的双离合双离合液力变矩器柔性飞轮是一种采用两体式挠性结构的新型飞轮,以解决一体式挠性盘飞轮存在的以上缺陷,其新颖的结构,在保证使用功能的前提下,可以根据曲轴和液力变矩器的结构和布置,来设计多种形式的两体式柔性飞轮,且不会因为挠性盘的设计结构相对固定,在搭载不同的车型时影响传动系统在车身内的整体布置。同时,挠性盘和增加的挠性板因自身所具有的柔度,使其具有动力传递平稳、抗冲击缓冲性能高、扭力矩大等多种特点,且两块挠性结构各自承受的多方向不同载荷要比原有的单独一块挠性盘要少,这样大大有利于多种结构的设计和多种原材料的选取。

在与企业合作和利用有限元法^[12]对其动态特性进行分析研究的基础上,由此开发出新型双体柔性飞轮。

1 双体柔性飞轮结构组成

如图 1 所示,双体柔性飞轮总成由挠性板 2(其上有花键毂 1 和 6 个压紧螺母 3)、中间飞轮 4、联接板 5、挠性盘 7(装有启动齿圈 6)组成。

挠性盘 7 通过联接板 5 与曲轴末端连接,挠性



1. 花键毂 2. 挠性板 3. 压紧螺母
4. 中间飞轮 5. 联接板 6. 启动齿圈 7. 挠性盘
图 1 双离合双液力变矩器飞轮总成结构示意图

板 2、中间飞轮 4 和挠性盘 7 通过高强度螺栓固定连接,启动齿圈与起动机齿轮啮合,花键毂 1 与输出轴相连接,实现发动机与变速箱之间运动与动力的传递。

2 惯性力作用下的结构应力分析

为使有限元模型网格规模不致过大,建模时忽略了一些小的细节,如小倒角、定位孔等,并假设:1) 飞轮总成以恒定的转速作高速旋转;2) 整个飞轮只受惯性力作用。

为研究比较一体式和两体式飞轮的应力分布情况,并为挠性板的外形及结构参数提供设计依据,也为超高速试验^[13]提供对比数据。一体式飞轮和两体式飞轮的实体模型分别导入 Workbench 有限元分析软件中,定义其材料属性,并进行有限元网格划分,得到有限元模型如图 2 所示。

一体式有限元模型包含 111 899 个节点、35 897 个单元;两体式有限元模型包含 149 943 个节点、48 245 个单元。

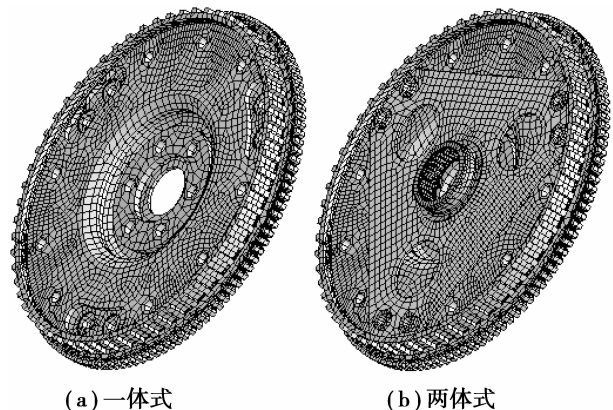


图 2 两种不同形式的有限元模型

分别在图2(a)及图2(b)的模型的中心孔处施加轴向和径向约束。汽车发动机的正常工作转速为1 000~6 000 r/min,取计算转速 $n=6\ 000$ r/min,应力场计算结果如图3所示。

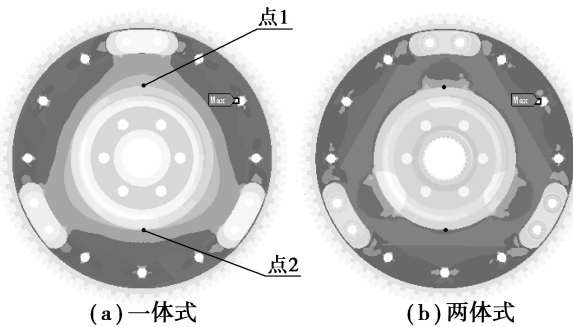


图3 两模型的正面应力分布图

由图3(a)知,一体式模型在中间飞轮上呈类三角形的应力集中,加入柔性盘之后,柔性盘承担部分应力,如图3b所示,使整体应力集中明显减小。

在中心孔取点1、2(位置见图3),计算应力大小 σ_1 、 σ_2 以及两模型中间飞轮最大应力 σ_{max} ,应力计算结果如表1。表1计算结果显示,两体式同一位置上的应力要小于一体式的应力,且中间飞轮的材料为铸铁,屈服强度为290 MPa,故双体柔性飞轮一种既满足应力条件、节省材料的结构形状,同时加强了飞轮的整体强度。

表1 两模型三位置的计算应力

	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	σ_{max} /MPa
一体式	61.207	50.873	87.815
两体式	43.607	35.356	76.029

3 模态分析

为研究比较一体式和两体式飞轮的动态特性,应用ANSYS Workbench软件中的Modal模块对两模型进行模态分析^[14]。此处提取了前3阶模态固有频率及相应的振型。图4、5所示为第1~3阶模态振型。表2~3给出了第1~3阶模态的固有频率、振型特征及最大变形量。

从图4~5可以看出,两模型第1阶振型基本相似,而两体式飞轮相对一体式飞轮的第2阶和第3阶的振动较规律,且两体式第2阶主要表现为挠性

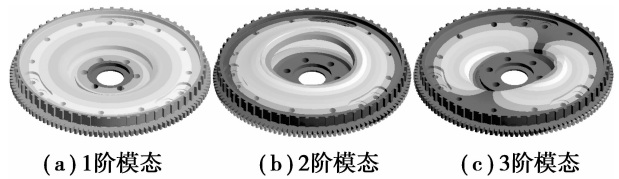


图4 一体式飞轮第1~3阶模态振型

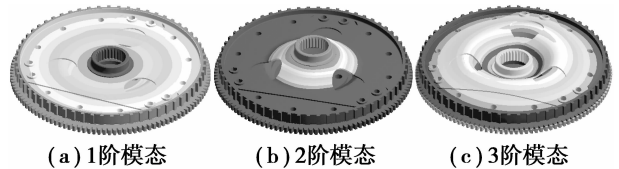


图5 两体式飞轮第1~3阶模态振型

板的剧烈振动,但是中间飞轮和挠性盘偏离其平衡位置的最大位移量很小。

从表2、表3可以看出,从低频段的振动情况看,两体式的最大变形量有所减小;从高频段的振动情况看,两体式飞轮第3阶固有频率介于一体式飞轮的第2阶和第3阶固有频率之间,但两体式飞轮的第3阶模态最大变形量比一体式飞轮第2阶和第3阶模态最大变形量都要小。

故双离合器双液力变矩器两体式柔性飞轮的挠性板能起到较好的减振作用。

表2 一体式飞轮第1~3阶模态频率、振型及最大变形量

阶次	n /Hz	振型特征	δ_{max} /mm
1	16.861	扭转	16.232
2	2161.3	轴向、弯曲振动	34.065
3	2575.5	弯曲振动	46.042

表3 两体式飞轮第1~3阶模态频率、振型及最大变形量

阶次	n /Hz	振型特征	δ_{max} /mm
1	23.53	扭转	15.802
2	797.43	轴向振动	63.652
3	2408.1	轴向、弯曲振动	32.755

4 谐响应分析

为了研究双离合器双液力变矩器在激振力的作用下的轴向振动情况以及柔性盘减小振动的作用,应用Workbench软件中的Harmonic Response模块对两模型进行谐响应分析,在模型的中心孔位置

施加轴向和径向约束,采用“大质量法”^[15],在中心轴位置施加加速度惯性载荷。系统设置参数如下:加速度激励幅值, $a = 20 \text{ m/s}^2$; 频率的范围为 $1\ 000 \sim 2\ 600 \text{ Hz}$; 阻尼比为 0.05 , 得到幅值-频率的关系曲线如图 6 所示。

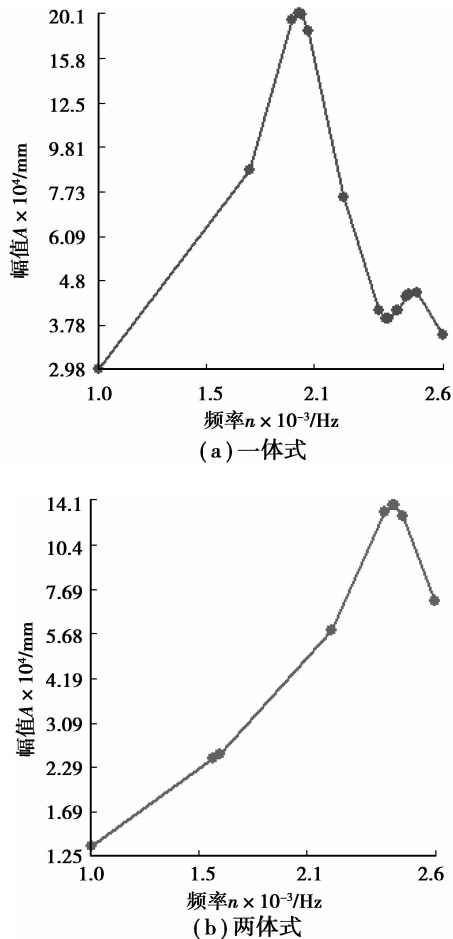


图 6 幅值-频率的关系曲线

结果显示,一体式飞轮的响应最大幅值为 $2.01 \times 10^{-3} \text{ mm}$, 而两体式飞轮的响应最大幅值仅为 $1.41 \times 10^{-3} \text{ mm}$, 表明在受到简谐激励的情况下, 双体式飞轮能表现出良好的冲击缓冲效果, 且两体式的共振频率提高, 避免与其他部件产生共振。

如图 7 所示, 两体式飞轮中挠性板与中间飞轮的相位角的变化曲线基本相似, 但两者之间存在一定的相位差, 使得挠性板的位移振动相对于中间飞轮出现滞后, 两体式的响应最大幅值小于一体式的响应最大幅值, 缓冲了中间飞轮的振动。

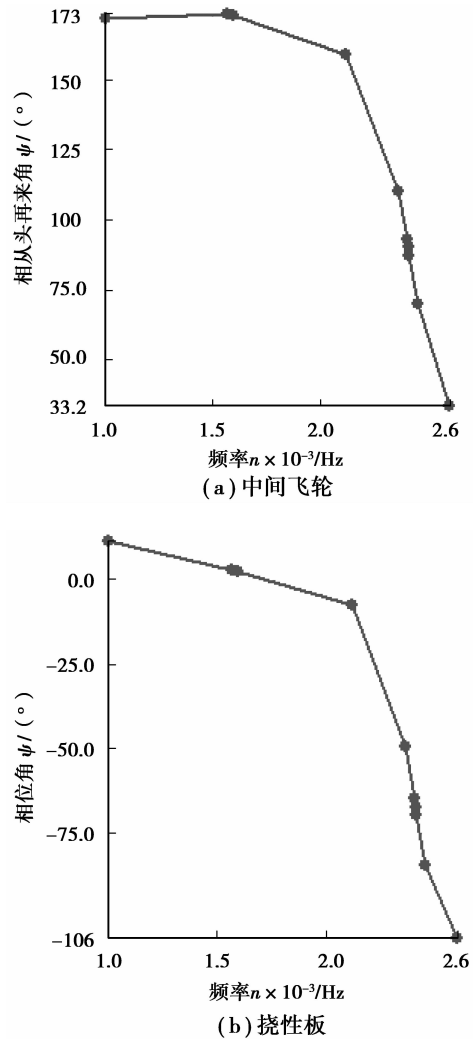
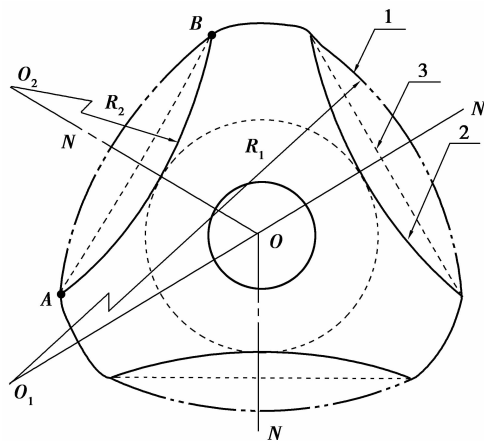


图 7 相位角-频率的关系曲线

5 挠性板结构形状优化

挠性板 2 是飞轮总成中的重要部件, 其轴向刚度直接影响飞轮的轴向减振特性, 在满足强度的条件下, 应使挠性板具有一定的轴向柔性而总成的轴向振幅较小, 考虑其上压紧螺母的焊接强度(见图 1 标号 3), 取板厚 $\delta = 2 \text{ mm}$, 对挠性板取不同曲线形状进行结构形状优化, 如图 8 所示。

根据图 3 一体式飞轮的应力分布呈类三角形的形状提出优化型线, 在点 A、B 的对称轴 ON 上取圆心, 以不同的半径画弧连接 A、B 点, 其结构外形限制条件为: 圆弧曲线不能超越中间飞轮的螺栓孔和中心孔, 即在型线 1 和型线 2 之间, 通过改变圆弧半径的大小和位置, 获取不同的曲线。



1. 外凸圆弧曲线 2. 内凹圆弧曲线 3. 直线

图8 外形形状型线

以直线型线3计算结果为对照基准,将不同半径型线的挠性板分别装配到飞轮总成中,依次进行应力分析、模态分析和谐响应分析,研究在满足强度条件下,获得具有最佳动力学特性的形状优选方案。外凸圆弧和内凹圆弧的最优型线的结果为:型线1(方案1)圆弧半径 $R_1=431.5$ mm,圆弧中心 O_1 距圆心 O 的距离 $L_{O_1O}=328.5$ mm;型线2(方案2)圆弧半径 $R_2=275$ mm,圆弧中心 O_2 距圆心 O 的距离 $L_{O_2O}=350$ mm。对比其计算结果如表4~6所示。

以变化量描述计算结果的比较,变化量的含义为:(圆弧型线计算结果-直线型线3的计算结果)/直线型线3的计算结果 $\times 100\%$ 。

由表4知,采用内凹圆弧获外凸圆弧型线与直线型线相比,应力变化量不大,且均能满足强度要求。

汽车发动机工作转速范围为1 000~6 000 r/min,所产生的激振频率范围为33~200 Hz,故飞轮的固有频率应避免在正常工况下产生共振,从模态分析的对比数据,两方案在避免共振方面满足要求。

比较谐响应分析得到的数据,最大振幅值 A 都有所减小,表明方案1跟方案2都能起到减小整体振动的作用,方案1通过增加面积和刚度,在自身变形量变小(Δx_{\max} 值减小)的同时,也减小了整体振动,方案2则通过增加挠性板的柔性,虽然自身变形量变大(Δx_{\max} 值增大),但减小整体振动的效果较明显。

综合对比分析,方案2在提高整体性能方面表现较好且重量更轻,是符合优化设计所要求的型线。

表4 最大应力结果对比

方案	应力 σ_{\max} /MPa	变化量
1	74.833	-1.57%
2	76.302	+0.36%

表5 模态分析各阶固有频率结果对比

阶次	方案1		方案2	
	固有频率 n /Hz	变化量	固有频率 n /Hz	变化量
1	22.945	-2.49%	22.402	-4.79%
2	809.22	+1.48%	752.21	-5.67%
3	2451.2	+1.79%	2400	-0.34%

表6 谐响应分析中输出结果对比

方案	最大振幅值 A /mm	变化量	最大轴向 变形量	
			Δx_{\max} /mm	变化量
1	3.0×10^{-5}	-2.81%	9.70×10^{-4}	-9.34%
2	2.86×10^{-5}	-7.54%	1.17×10^{-3}	+9.20%

6 试验验证

爆裂试验转速为 $n=13\ 000$ r/min,应用文中所述惯性力作用下的应力分析的方法,在柔性盘上出现的最大应力为608.35 MPa,柔性盘为调质钢,其屈服强度为720 MPa。对飞轮进行该转速下作超速试验,停留时间5 min,飞轮未发生破裂损坏。

以双离合器双液力变矩器柔性飞轮为对象,进行其振动响应的试验验证,采用锤击法对飞轮进行其敲击试验,加速度传感器安装在飞轮总成前端,检测的振动位移信号与飞轮前端冲击锤的力信号放大后进入信号采集处理分析仪,计算机读取数字信号,再利用文献[16]的方法进行数字信号分析。

表7 试验条件

仪器类型	型号
智能信号采集处理分析仪	INV306DF
双通道电荷放大器	DLF-3
力锤	LC1301
力传感器	LC0501
加速度传感器	LC0101

表 7 为锤击法对飞轮进行响应的多点激励试验的试验条件,力锤与飞轮接触瞬间,产生很大的冲击力,之后,冲击力信号很快衰减,而飞轮在收到力锤的冲击之后,瞬间获得很大的加速度,而后响应信号逐渐衰减,其所产生的振动信号频谱如图 9 所示。

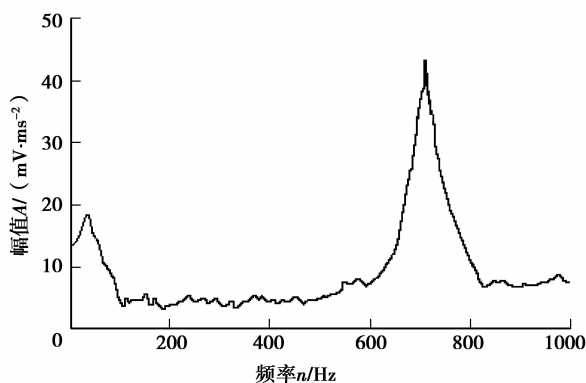


图 9 飞轮总成振动信号频谱

图 9 中 20.137、703.89 Hz 为飞轮的前二阶频率,其余的波峰为电磁噪声的干扰振动频率,试验得到的前两阶频率,与 ANSYS Workbench 计算的固有频率相比略低,这是因为在建模采用了一些简化和理想的假设,因而计算固有频率有所提高。将实测值与有限元得计算结果进行比较,列表如表 8 所示,计算结果与实测值误差不超过 9%,验证了理论模态分析的正确性。

表 8 飞轮各阶模态频率

	实测值 n/Hz	计算值 n'/Hz	误差
1 阶	20.637	22.402	8.55%
2 阶	703.89	752.21	6.42%

7 结 论

1) 双体式柔性飞轮的结构新颖性,使飞轮的设计在搭载不同车型的条件下更易于实现,是一种既满足强度条件又满足动力学特性的结构形式。

2) 对双体式和一体式结构应力、模态分析的基础上对其进行谐响应分析,验证了双体式比一体式具有更好的冲击缓冲效果,能保证产品具有良好的动力学性能。

3) 在兼顾满足强度的条件下,通过改变挠性板的曲线形状即改变挠性板的柔度,实现了所要求的动力学特性,使得飞轮总成具有更好的减振效果。

参考文献:

- [1] 吴佐铭,褚超美,黄明礼,等. 双离合自动变速器技术研究进展与应用现状[J]. 机械设计与制造, 2008(11):241-243.
WU Zuoming, CHU Chaomei, HUANG Mingli, et al. Research progress of dual-clutch transmission and application [J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(11):241-243.
- [2] Matthes B. Dual clutch transmissions: lessons learned and future potential[C]// Proceedings of the 2005 SAE World Congress, April 11-14, 2005, Detroit, Michigan. [S. l.]: SAE Technical Papers, 2005: 2005-01-1021.
- [3] 周霞,高岚,曲国辉. 一种柴油机球墨铸铁飞轮疲劳磨损失效分析[C/OL]// 中国力学学会 2009 学术大会: 中国力学学会 2009 学术大会论文集, 8 月 24 日, 2009 年, 郑州, 河南 [2011-09-10]. <http://wenku.baidu.com/view/2f04c2de3186bceb19e8bbcc.html>.
- [4] 闫晓磊,钟志华,查云飞,等. 功能梯度材料飞轮转子优化设计[J]. 机械工程学报, 2011,47(2):72-79.
YAN Xiaolei, ZHONG Zhihua, ZHAYunfei, et al. Optimum design of flywheel rotor made of functionally graded materials [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011,47(2):72-79.
- [5] Fabien B C. A comparison of optimized stacked-ply flywheel designs that are based on different failure criteria [C]// Proceedings of the ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, September 24-28, Long Beach, CA, USA. New York: ASME, 2005: 371-380.
- [6] 郝琪. 车用飞轮的优化设计[J]. 机械, 2006,33(1): 26-27,38.
HAO Qi. Optimized design of flywheel in vehicle[J]. Machinery, 2006,33(1):26-27,38.
- [7] Arslan M A. Flywheel geometry design for improved energy storage using finite element analysis [J]. Materials and Design, 2008, 29(2): 514-518.
- [8] Gantovnik V, Tiwari S, Fadel G, et al. Multi-objective optimization of heterogeneous non-uniform flywheel [C]// Proceedings of the 48th AIAA/ ASME/ ASCE/ AHS /ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, April 23-26 2007, Waikiki, HI, USA. [S. l.]: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007: 7095-7104.

(下转第 140 页)

- of the random waypoint mobility model for wireless Ad Hoc networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003, 2(3): 257-269.
- [10] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C S. Performance analysis of mobility-assisted routing [C]// Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, May 22-25, 2006, Florence, Italy. New York, USA: ACM, 2006: 49-60.
- [11] Mundur P, Seligman M, Lee G. Epidemic routing with immunity in delay tolerant networks[C]// Proceedings of the 2008 IEEE Military Communications Conference, November 16-19, 2008, San Diego, CA. Piscataway: IEEE, 2008: 1-7.
- [12] Tang S S, Li W. QoS provisioning and queue management in mobile Ad Hoc networks [C]// Proceedings of the 2006 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, April 3-6, 2006, Las Vegas, NV. Piscataway: IEEE, 2006, 1: 400-405.
- [13] Keränen A, Ott J, Kärkkäinen T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation [C] // Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques, March 2-6, Rome, Italy. New York, USA: ACM, 2009: 1-10.
- [14] Thompson N, Nelson S C, Bakht M, et al. Retiring replicants: congestion control for intermittently-connected networks[C]// Proceedings of the 2010 IEEE INFOCOM, March 14-19, 2010, San Diego, USA. Piscataway: IEEE, 2010: 1-9.
- [15] Soares V N G J, Farahmand F, Rodrigues J J P C. Impact of vehicle movement models on VDTN routing strategies for rural connectivity [J]. International Journal of Mobile Network Design and Innovation, 2009, 3(2): 103-111.

(编辑 侯 湘)

~~~~~

(上接第 120 页)

- [9] 马迅, 周红妮, 陈莎. 发动机飞轮的动态优化设计[J]. 机械设计与制造, 2004(5):63-65.  
MA Xun, ZHOU Hongni, CHEN Sha. Dynamic optimized design of a internal combustion engine flywheel [J]. Machinery Design & Manufacture, 2004(5):63-65.
- [10] Tongele T, Mohammed A. Experimental stress measurement using photostress-plus: engine flywheel case-study [C]// Proceedings of the ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE2008, August 3-6, 2008, Brooklyn, NY, USA. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2008: 851-854.
- [11] 谢贵君. 四缸内燃机曲轴-飞轮组结构模态分析[J]. 机械管理开发, 2009, 24(4):3-4.  
XIE Guijun. Structural modal analysis for the crankshaft/flywheel component of a 4-cylinder IC engine [J]. Mechanical Management and Development, 2009, 24(4):3-4.
- [12] Ren Z Y, Liu J N, Li Q F, et al. Finite element analysis of composite flywheel with two-layer pre-stressed rotor structure[J]. Advances in Fracture and Damage Mechanics X, 2012, 488/489: 134-137.
- [13] 慈铁军. 汽轮机启动和超速试验对转子脆性裂纹影响的分析[J]. 机械研究与应用, 2006, 19(1):43-44.  
CI Tiejun. Analysis of turbine start-up and over-speed experimentation influencing rotor brittleness crack[J]. Mechanical Research & Application, 2006, 19(1): 43-44.
- [14] 唐勇, 张志强, 唐胜利, 等. 双渐开线齿轮的模态与振动响应[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, 29(10): 61-64.  
TANG Yong, ZHANG Zhiqiang, TANG Shengli, et al. The mode and vibration response of the double involute gear [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29(10): 61-64.
- [15] Zhang J P, Zhao X H, Suo Z G, et al. A finite element method for transient analysis of concurrent large deformation and mass transport in gels[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(9): 093-522.
- [16] Wang Sicheng. Review and trend of solar photovoltaic technology[J]. International Power, 1997(4):21-23.

(编辑 张小强)