叶盘结构频率转向特征及失谐敏感性实验研究

赵志彬　贺尔铭　王红建　陈　熠
西北工业大学，西安，710072

摘要：搭建了用于失谐叶盘结构固有特性及失谐敏感性研究的实验平台，对谐调叶盘结构的频率转向现象进行了实验研究，验证了以往理论分析和有限元仿真中发现的频率转向特征和模态振型转换现象；通过在叶尖粘贴不同的质量块，模拟了三种典型的叶片失谐形式，实验研究了失谐叶盘结构的模态局部化问题；针对同一叶片失谐形式下不同的模态密度区域，实验研究了模态密度对失谐敏感性的影响规律。实验结果与有限元实验仿真结果吻合较好。

关键词：叶盘结构；频率转向；模态局部化；模态密度；失谐敏感性
中图分类号：V231.92　　DOI：10.3969/j.issn.1004－132X.2013.01.015

Experimental Investigation on Frequency Veering and Mistuning Sensitivity of Bladed Disks

Zhao Zhibin　He Erming　Wang Hongjian　Chen Yi
Northwestern Polytechnical University，Xi'an，710072

Abstract：Experimental setups were built for investigation of vibration of tuned and mistuning bladed disks herein. A stationary，nominally periodic，12－bladed disk with simplified geometry was manufactured. The frequency veering in natural frequency curves vurse nodal diameter figure was captured from the experimental results of the tuned bladed disk and the mode shape exchange related to the frequency veering was observed. By adding small blocks with different weights to the blade tips，three typical mistuned bladed disk were simulated in the experiment，and the mode localization was verified in all of the three blade mistuned speciments. The relationship between modal density and mistuning sensitivity of bladed disk was studied. The experimental results indicate that the localization of the mode shapes is most acute in frequency regions of high modal density. All the experimental results are very good agreement with those of the finite element analysis.

Key words：bladed disk；frequency veering；mode localization；modal density；mistuning sensitivity

0　引言

叶盘结构对小量的叶片失谐非常敏感，叶片失谐一般表现为叶片质量失谐或刚度失谐，即叶片内和叶片间的质量或刚度不是均匀分布的，而是存在着微小变化。失谐能够引起叶盘结构振动响应局部化，从而加快叶片的高周疲劳失效。以叶片模态局部化程度为衡量标准，国内外研究人员均对叶盘结构频率转向特征与失谐敏感性间的关系进行了大量的研究。

谐调叶盘结构特征频率随着节径变化的轨迹线先汇聚但不交叉，然后再分离的现象，称为频率转向，这是对称结构的一种独特现象。Pierre[1]最先对失谐叶盘结构的模态局部化现象和频率转向特征进行了理论研究。Hussein 等[2]指出在影响叶盘结构失谐敏感性的众多因素中，频率转向特性尤为重要，并对谐调叶盘结构的频率转向特征和失谐叶盘结构的失谐敏感性之间的关系进行了有限元仿真研究，定量分析了频率转向区域不同位置的失谐敏感性。Kenyon 等[3-5]研究发现，频率转向区中的系统模态高度密集。因此，在对应频率转向区域的失谐叶盘结构受迫振动响应中，会有更多的系统模态参与振动，增加了叶盘结构对失谐的敏感性。

在国内，贺尔铭课题组[6-7]对失谐叶盘结构的振动局部化问题进行了深入的理论研究，总结了叶盘结构频率转向特征与失谐敏感性间的内在关系。王建军等[8]提出了一种定量评价失谐叶盘结构振动模态局部化程度的方法。

相对于对叶盘结构失谐敏感性大量的理论研究，由于实验构件在失谐、激振与测量等方面实现的复杂性，目前只有极少学者开展了对失谐叶盘振动的实验研究。Kruse 等[9]的实验失谐叶盘通过改变叶片长度来满足失谐要求，较早地研究了谐调和失谐叶盘结构的固有模态特性，但每个叶盘结构试验件只能针对一种特定的失谐进行实验。Judge 等[10]搭建了一种无接触声激励和光学测量的叶盘行波激振实验系统，而 Jones[11]利用

收稿日期：2011—10—25
基金项目：国家自然科学基金资助项目(50775181)；西北工业大学基础研究基金资助项目(JC20110237)

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

电磁激振器产生行波激振力，但这两种无接触行波激励叶盘实验系统异常复杂、实验成本较高。

鉴于以上方法的优缺点，本文搭建了基于接触式行波激励与激光测振技术的叶盘系统实验平台，由各叶片根部的压电陶瓷激振片提供行波激振力，通过更换粘贴在叶尖的质量块实现多种典型叶片失谐，对叶盘结构的频率转向、模态局部化及失谐敏感性等进行了系统的实验研究，为进一步开展失谐叶盘结构受迫振动实验研究奠定了基础。

1 叶盘结构仿真模型及实验系统

1.1 叶盘结构有限元模型

叶盘结构的叶片失谐具有随机性，需要通过统计分析来研究失谐叶盘结构的振动特性，但限于时间和费用，不可能对失谐叶盘结构进行实验统计研究。为了降低实验费用、缩短实验时间，达到用有限次实验较好地模拟典型叶片随机失谐特性的目的，本文首先在 MATLAB 中采用单扇区两自由度的集中质量—弹簧模型对叶片随机失谐进行了统计研究，获得了多组导致严重模态局部化的失谐形式，然后在 ANSYS 中分别建立相应的失谐有限元模型，筛选出 3 组模态局部化最严重的典型叶片失谐形式进行实验验证。

在 ANSYS 中建立的叶盘结构有限元模型如图 1 所示，叶盘和叶尖质量块用六面体单元 Solid45 划分，阻尼系数取 0.002；压电陶瓷激振片用耦合场六面体单元 Solid5 划分，在其上下表面分别施加 20V 电压和零电压。

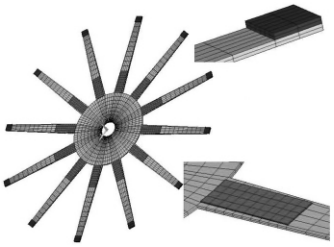


图 1 叶盘结构有限元模型

考虑到离散可能导致各叶片的网格有差异，出现人为的“失谐”，本文建立的谐调叶盘结构有限元模型在各叶尖附加了完全相同的小质量块，离散后的网格数量与大小也完全一致，通过改变叶尖质量块的密度来模拟不同的叶片失谐形式。

1.2 实验系统

图 2 所示为本文搭建的叶盘结构振动实验系统，该实验系统由激振系统、叶盘结构、激光测振及分析系统三部分组成。其中，激振系统的软件为自主开发的“叶盘振动实验行波信号发生器”，其工作原理可参考文献[12]；谐调叶盘由一块铝板整体加工而成，压电陶瓷激振片粘贴在各叶片根部，通过输入激振片的电压信号间的相位差来模拟叶片旋转，为避免激振片间的电压干扰，在铝板表面镀有一层绝缘膜；叶盘结构的振动信号由 PSV－400 全场扫描式激光测振仪拾取，为获得叶片的扭转和高阶弯曲模态，每个叶片上分布了 3 列 9 行共 27 个测点。

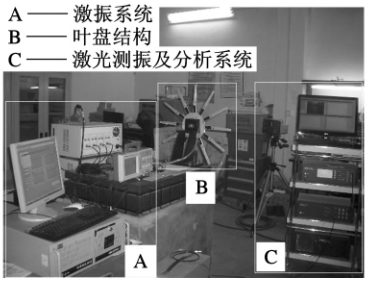


图 2 叶盘结构振动实验系统

本实验采用多点激励多点单向响应的方法，获得叶盘结构的响应特性，其简要工作流程如下：由“叶盘振动实验行波信号发生器”生成虚拟信号，写入 PCI－6723 模拟输出卡，通过 CB－68 端子板，分成 14 路相互独立的电压信号，其中 12 路信号经功率放大器增幅到稳定的 20V 正弦信号之后，分别接入压电陶瓷激振片，另 2 路信号接入示波器，实时监测其相位差与频率，以确保输送到压电陶瓷激振片中的信号准确无误。最后，由激光测振系统获得叶盘上指定测点的振动响应信号，并进行后处理。

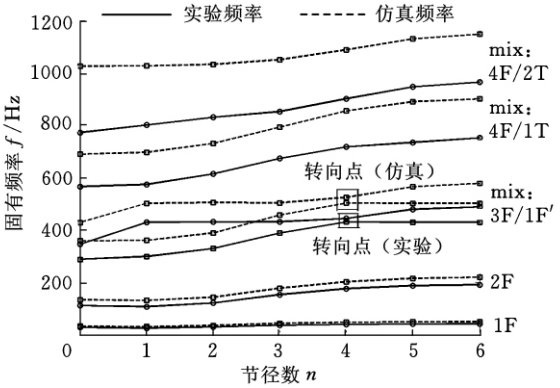
2 谐调叶盘结构频率转向特征实验结果及分析

为得到实验叶盘结构的频率转向特征，本文首先对谐调叶盘结构有限元模型进行了模态分析，得到各节径对应的固有频率，确定了频率转向区域的频率范围为 350～600Hz，因此实验时扫频范围设为 1～1000Hz。

图 3 所示为谐调叶盘结构实验实测和有限元仿真得到的固有频率—节径曲线，实线为实验实测数据，虚线为有限元仿真结果，从图中可以观察到明显的频率转向特征，转向点（图 3 中的方框处）位于 3、4 模态族的 4 节径。

从图 3 中还可以看到，除参与频率转向的 3、4 模态族外，对应同一模态族，随着节径数的增加，轮盘的“刚度”和“硬度”变大，实验与仿真得到的叶盘结构固有频率也逐渐增加，但实验和仿真得到的频率轨迹线平行却不重合。两条频率轨迹

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



F—离面弯曲　F′—面内弯曲　T—扭转

图 3　谐调叶盘结构固有频率－节径图

线近似平行，这一结果从侧面验证了实验方案的合理性和实验结果的准确性；两条频率轨迹线不重合的原因有两个，一是由于实验叶盘结构在加工、安装及固定过程中不可避免地改变叶盘结构局部刚度，二是粘贴激振片和叶尖质量块时引入的粘贴剂增加了叶盘结构的质量，因此实验实测的固有频率都小于有限元仿真结果。

在频率转向区域，除模态比较集中外，还存在模态振型转换现象，如图 4 所示，经过转向点时振动在轮盘占优模态族和叶片占优模态族间发生了转换。在转向点之前，第 3 模态族的振动属于轮盘占优模态族，叶片振动为离面三弯模态，第 4 模态族的振动属于叶片占优模态族，叶片振动为面内一弯模态。通过转向点之后，两条模态族的振型进行了互换，第 3 模态族的振动变为叶片面内一弯模态的叶片占优模态族，第 4 模态族的振动变为轮盘占优模态族的叶片离面三弯模态。

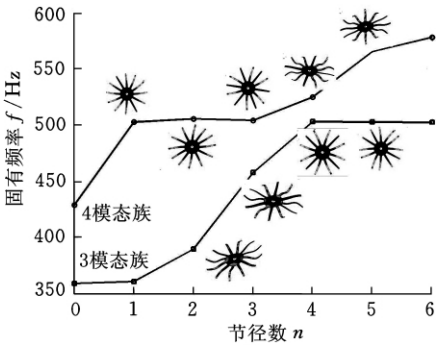


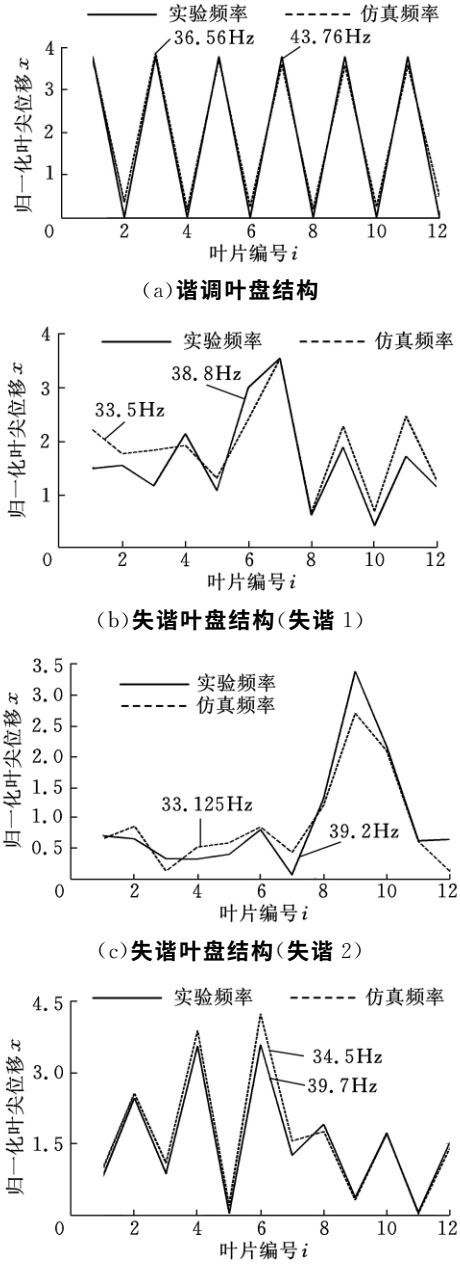
图 4　谐调叶盘结构频率转向区域的模态振型转换

3　叶盘结构失谐敏感性实验结果及分析

3.1　失谐叶盘结构模态局部化现象

由于失谐阻隔了振动能量在叶片间的正常传递，迫使振动能量集中在少数几个甚至一个叶片中，使模态振型出现局部化现象，即振型中只有一两个叶片的幅值较大，而其他叶片的幅值都很小的现象。因此，将模态局部化的程度作为系统对失谐敏感性的衡量标准，模态局部化越严重，系统对失谐越敏感。

本实验通过在叶尖粘贴质量块模拟了 3 组典型失谐形式，获得了谐调和失谐叶盘结构前 30 阶的模态振型。图 5 比较了谐调和失谐叶盘结构叶片离面一弯模态时叶尖位移归一化后的实验和仿真结果，对应了谐调叶盘结构第 1 模态族 3 节径的振型。



(a)谐调叶盘结构

(b)失谐叶盘结构(失谐 1)

(c)失谐叶盘结构(失谐 2)

(d)失谐叶盘结构(失谐 3)

图 5　叶片离面一弯模态振型比较(第 1 模态族 3 节径)

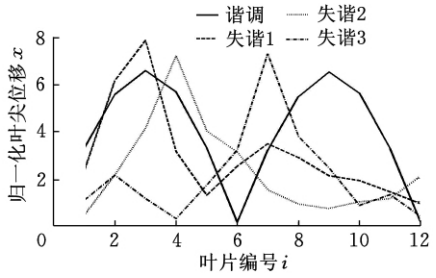
从图 5 可以看到，谐调叶盘结构表现出明显的 3 节径波形特征，引入失谐后，这些模态出现了非常显著的模态能量集中现象。另外，对比实验和仿真结果，其高度一致性再次验证了实验结果的准确。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

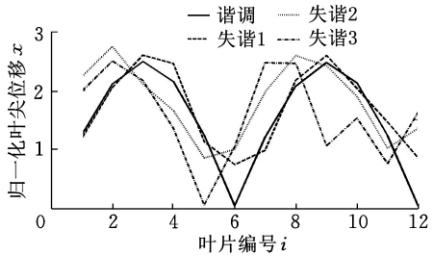
3.2 叶盘结构失谐敏感性实验研究

在图 3 所示的曲线图中，根据频率轨迹线斜率的大小将振动分为叶片占优模态族和轮盘占优模态族，分别表征了振动能量的集中区域[6]。模态密度反映了一定频率范围内包含的模态数，根据模态密度的不同在频率轨迹线中选定了三个区域：叶片面内一弯振动（叶片占优模态族，模态密度最大）、叶片离面一弯振动（叶片占优模态族，模态密度次之）和叶片离面三弯振动（轮盘占优模态族，模态密度最小）。

本文通过实验验证了文献[5]中给出的模态密度与叶盘结构失谐敏感性间的关系。实验中，在高模态密度区域选定 430Hz，在低模态密度区域选定 300Hz，分别获得这两个频率对应的谐调和失谐叶盘结构模态振型，如图 6 所示。



(a)高模态密度，430Hz



(b)低模态密度，300Hz

图 6 谐调和失谐叶盘结构不同模态密度对应的实测模态振型

图 6a 所示为实验获得的第 4 模态族 1 节径处谐调和失谐叶盘结构的模态振型，该区域模态密度最高，失谐引起的模态局部化也最严重，也就是说该区域对失谐最敏感。

图 6b 所示为实验获得的第 3 模态族 1 节径处谐调和失谐叶盘结构的模态振型，该区域模态密度最低，相对于谐调叶盘结构的模态振型，三种失谐叶盘结构的模态振型基本上没有变化，还是正弦曲线，因此该区域对失谐最不敏感。

图 5 所示为实验获得的第 1 模态族 3 节径处谐调和失谐叶盘结构的模态振型，该区域约为 33～36Hz，对应着中等模态密度，从图中可知，该区域对失谐也比较敏感，但不是全部三种随机失谐都能引起严重的模态局部化。

比较图 5 和图 6 可知，模态密度越大，失谐叶盘结构模态局部化越严重，亦即对失谐越敏感。而在轮盘占优模态族中，叶片失谐对叶盘结构的振动模态基本上没有影响。

4 结论

(1)通过谐调叶盘结构振动实验，验证了在理论分析和有限元仿真中发现的谐调叶盘结构固有频率－节径图中的频率转向特征，以及与频率转向相应的模态族之间存在的模态振型转换现象。

(2)为达到只用有限次实验较好地模拟典型叶片随机失谐的目的，首先在 MATLAB 中对叶盘结构叶片随机失谐引起的模态局部化特性进行统计分析，筛选出一组随机失谐形式，然后在 ANSYS 中进行有限元仿真，最终确定三组典型失谐形式进行实验验证。结果表明本文的这一研究路径是正确可行的。

(3)失谐会导致强烈的模态局部化现象，模态局部化程度与叶盘结构固有频率－节径图中的模态密度有关，模态密度越大，该区域的固有频率对应的模态局部化越严重，叶盘结构对失谐越敏感。

参考文献：

[1] Pierre C. Mode Localization and Eigenvalue Loci Veering Phenomena in Disordered Structures[J]. Journal of Sound and Vibrarion, 1988, 126(3): 485-502.

[2] Hussein M I, Pierre C. Correlation of Tuned Free Vibration Characteristics with Mistuning Sensitivity for a Bladed Disk[C]//44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Norfolk, Virginia: AIAA, 2003-1544.

[3] Kenyon J A, Griffin J H, Kim N E. Frequency Veering Effects on Mistuned Bladed Disk Forced Response [C]//39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Huntsville, Alabama: AIAA, 2003-4976.

[4] Kenyon J A. Maximum Mistuned Bladed Disk Forced Response with Frequency Veering[C]//40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Fort Lauderdale, Florida: AIAA, 2004-3753.

[5] Kenyon J A, Griffin J H, Kim N E. Sensitivity of Turned Bladed Disk Response to Frequency Veering [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127: 835-842.

[6] 王红建，贺尔铭，赵志彬. 频率转向特征对失谐叶

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

盘模态局部化的作用[J]. 中国机械工程，2009，20(1)：82-85.
Wang Hongjian，Zhao Zhibin，He Erming. Effects of Frequency Veering Features on Mode Localization of Mistuned Bladed Disks[J]. China Mechanical Engineering，2009，20(1)：82-85.

[7] 赵志彬，贺尔铭，王红建. 叶盘振动失谐敏感性与频率转向特性内在关系研究[J]. 机械科学与技术，2010，29(12)：1606-1611.
Zhao Zhibin，He Erming，Wang Hongjian. Correlation between Frequency Veering and Vibration Mistuning Sensitivity of Bladed Disk[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering，2010，29(12)：1606-1611.

[8] 王建军，于长波，姚建尧，等. 失谐叶盘振动模态局部化定量描述方法[J]. 推进技术，2009，30(4)：457-461.
Wang Jianjun，Yu Changbo，Yao Jianyao. Vibratory Mode Localization Fcators of Mistuned Bladed Disk Assemblies[J]. Journal of Propulsion Technology，2009，30(4)：457-461.

[9] Kruse M J，Pierre C. An Experimental Investigation of Vibration Localization in Bladed Disks，Part I：Free Response[C]//42nd ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress. Orlando，Florida：ASME，1997-492.

[10] Judge J A，Ceccio S L，Pierre C. Traveling－wave Excitation and Optical Measurement Techniques for Non－contacting Investigation of Bladed Disk Dynamics[J]. The Shock and Vibration Digest，2003，35(3)：183-190.

[11] Jones K W. Mistuning for Minimum Maximum Bladed Disk Forced Response[C]//40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propusion Conference and Exhibit. Fort Lauderdale，Florida：AIAA，2004-3755.

[12] 陈熠，贺尔铭，赵志彬. 失谐叶盘振动实验虚拟行波信号发生器的设计[J]. 机械科学与技术，2011，50(5)：736-740.
Chen Yi，He Erming，Zhao Zhibin. Design of the Virtual Traveling Wave Signal Generator Used for Mistuning Bladed Disk Vibration Experiment[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering，2011，30(5)：736-740.　（编辑　郭　伟）

作者简介：赵志彬，男，1980年生。西北工业大学航空学院讲师、博士研究生。主要研究方向为复杂结构动力学建模与仿真。发表论文近10篇。贺尔铭，男，1964年生。西北工业大学航空学院教授、博士研究生导师。王红建，男，1968年生。西北工业大学航空学院副教授。陈　熠，男，1988年生。西北工业大学航空学院硕士研究生。

（上接第60页）

参考文献：

[1] 邵晓东，陈锋，刘刘焕玲. 基于特征的异构CAD模型转换技术研究[J]. 中国机械工程，2007，18(1)：60-64.
Shao Xiaodong，Chen Feng，Liu HuanLing. Study on Isomerous CAD Model Exchange Based on Feature[J]. China Mechanical Engineering，2007，18(1)：60-64.

[2] 刘云华，刘俊，陈立平. 产品三维数据模型轻量化表示实现[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2006，18(4)：602-607.
Liu Yunhua，Liu Jun，Chen Liping. Lightweight Representation for 3D Product Model[J]. Journal of Computer－Aided Design & Computer Graphics，2006，18(4)：602-607.

[3] 刘云华，陈立平，钟毅芳. 利用设计历史实现异构CAD系统特征信息交换[J]. 中国机械工程，2003，14(21)：1845-1847.
Liu Yunhua，Chen Liping，Zhong Yifang. Exchange Feature Information of Heterogeneous CAD Systems by Design History[J]. China Mechanical Engineering，2003，14(21)：1845-1847.

[4] 任延珍，高峰，张新访. 一种基于包容盒的逐层过滤的动态干涉检查方法[J]. 计算机应用与软件，1999，16(3)：30-35.
Ren Yanzhen，Gao Feng，Zhang Xinfang. A Dynamic Interference－examination Method with Gradnal Filterings Based on Envelope Boxes[J]. Computer Applications and Software，1999，16(3)：30-35.

[5] 行开新，田凌. 支持异地协同设计的异构CAD虚拟装配系统[J]. 清华大学学报，2009，49(2)：226-231.
Xing Kaixin，Tian Ling. Heterogeneous CAD Supported Virtual Assembly System for Distributed Collaborative Design[J]. Journal of Tsinghua University，2009，49(2)：226-231.

[6] 周之平. 面向虚拟装配的干涉检测关键技术研究[D]. 南京：东南大学，2006.

（编辑　郭　伟）

作者简介：刘清华，男，1970年生。华中科技大学国家CAD支撑软件工程技术研究中心副教授、博士。主要研究方向为产品数据管理、产品生命周期管理、CAD/CAM集成、协同设计。李　帅，男，1987年生。华中科技大学国家CAD支撑软件工程技术研究中心硕士研究生。刘云华，男，1974年生。，华中科技大学国家CAD支撑软件工程技术研究中心讲师、博士。万　立，男，1963年生。华中科技大学国家CAD支撑软件工程技术研究中心教授、博士研究生导师。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net