机舱条缝型风口模型射流场的 HWA 测量与分析

郭勇[1]，姚世勇[1]，姜　楠[1,2,3]

（1. 天津大学机械工程学院力学系，天津 300072；

2. 天津市现代工程力学重点实验室，天津 300072；

3. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室，北京，100190）

摘　要：使用高时间分辨率热线风速仪精细测量了两个模型舱（简化模型舱和七排座舱）条缝型送风口的射流流场。对两个模型流场沿流向、展向和法向变化的平均速度、湍流度、湍动能以及能谱进行了分析。平均速度的结果表明流场在近风口处沿展向具有明显的周期性，这种周期性在离开壁面一定流向距离后会消失，沿流向多条缝射流存在一定长度的速度核心区。湍流度以及湍动能的结果表明射流场脉动剧烈程度和湍流扩散发展规律，是各种尺度脉动成分叠加的结果。对能谱的分析揭示了惯性子区的存在，随着不断的发展，大尺度的能量在不断减少，通过惯性子区传递给小尺度结构并在更小尺度转化为热能。

关键词：条缝射流；热线测速技术；能谱；机舱模型

0　引　言

射流是指流体从各种形式的孔口或喷嘴射入同一种或另一种流体的流动。大量实验研究表明[1-3]，湍动射流一般分为三个区，即初始段、过渡段以及主体段。初始段由速度核心区和混合层两部分组成，其中核心区是能保持管内流动特点的区域；混合层是射流流体与周围环境静止流体开始发生掺混、卷吸的区域，是相干结构产生的地方，这里脉动最为强烈。射流的过渡段很短，一般在分析上常予以忽略。主体段流动呈现自相似的特点，是边界层充分发展的区域。湍动射流是自然界和工程技术中广泛应用的流动形态，例如室内通风、蒸汽泵、化工设备和喷气式飞机等。研究射流的流动形态不仅具有学术意义，而且能解决许多工程实际问题[4-5]。

大型客机舱内环境是国家经济、社会和科技自身发展的重大需求，我国对大型客机项目的安全、健康、舒适度等的研究有紧迫需要。创造高能效的安全、健康和舒适型座舱内环境是我国大飞机在国际竞争中体现竞争优势的重要保证，也是保障乘客和机组人员生命安全、健康和舒适并通过适航认证的关键。通过组织合理的气流来改善座舱环境安全性、健康性、舒适性是当前国际研究的重点，座舱中的环境空气流动是整个座舱环境的形成和控制的重要基础。其中射流区是整个舱内空间气流组织的动力源头，它决定了之后空间气流的流动特征，所以细致的近风口流场测量是之后其它流场区测量的前提和关键。客机舱内条缝送风口射流是一种特殊的射流形式。它的特殊性体现在，为了保证人体的舒适性所以必须要求射流速度较小；为了获得空间

基金项目：国家自然科学基金资助项目(11272233)，国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(NO.2012C B720101)，中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室(2011)对外开放课题，天津大学自主创新基金联合资助。

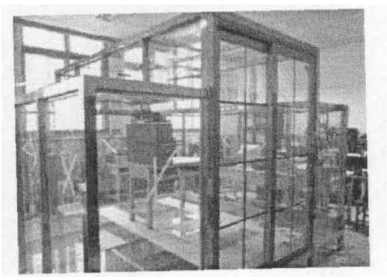
作者简介：郭勇（1987），男，天津市，硕士研究生，研究方向：实验流体力学. E-mail：guoyong1217@126.com

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

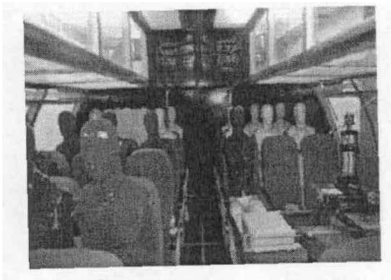
均匀、快速衰减的流场（增强混合）则要求射流具有较高的湍流度；对流场进行能谱分析，还要求高湍流度的脉动尽量由小尺度的成分构成，这样更能保证人体的舒适性。所以机舱内条缝风口射流是一种低 Re 数高湍流度的射流，与理想情况下研究的射流形式有较大区别。

1 实验条件和测试技术

实验利用 IFA 300 热线风速仪对两个机舱模型内条缝型风口的流场进行了测量，两个模型如图 1（a)、(b)。其中条缝模型安置在机舱行李架的下方，简化座舱内条缝模型全长 2.3m、上边宽 0.345m、高 0.145m，条缝所在平面与水平呈 60°。共有 105 个条缝，每个条缝长 50mm，宽 3.5mm，条缝的间距也为 3.5mm，即栅格的宽度为 3.5mm。七排座舱模型内的条缝模型与之相同（图 2)。



(a)



(b)

图 1 （a）简化座舱模型实物图；（b）七排座舱模型实物图

Fig.1 (a) Physical map of the simplified aircraft cabin model ; (b) Physical map of the 7-rows aircraft cabin model

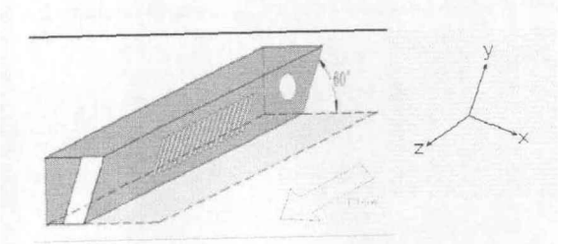


图 2 条缝型风口模型

Fig.2 Slot outlet model

IFA 300 恒温热线风速仪工作原理为：在流场中放置通过电流的金属丝敏感元件(图 3)时，由于电流的热效应金属丝会产生一定的热量，它在与周围流场的热交换过程中，流体流速的变化导致敏感组件的温度变化，继而引起其电阻的变化，在一定电路的配置下，可以建立起流体速度与电信号的对应关系，这样就可以通过测量热线的电压来确定流体的速度。

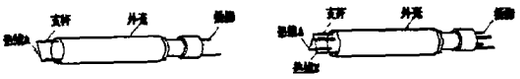


图 3 单丝、双丝热线探针

Fig.3 Single and X-type hot wire probe

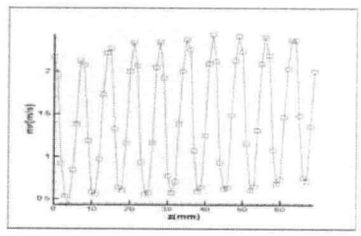
实验中采用定常、稳定的鼓风机作为气源，且其产生的气流温度与室温相同。探针的移动利用三维自动坐标架完成，其最小步长为 0.01mm。基于条缝宽度和射流中心速度计算的射流雷诺数简化座舱模型和七排座舱模型分别为：513 和 643。利用单丝热线探针分别测量了沿展向（z 方向）和流向（x 方向）的流场变化规律；用双丝探针分别测量了距离风口所在平面距离不变的沿展向（z 方向）不同位置的流向和展向速度分量以及不同流向位置沿法向（y 方向）变化的流向速度和法向速度分量。所有实验的采样频率设置为 100 KHz，对于一个空间点采集 4194304 个样本，耗时近 42s。

2 实验结果和特征量分析

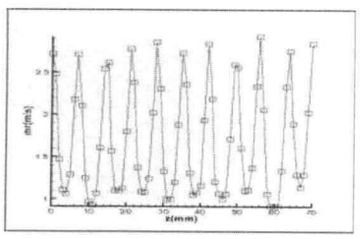
2.1 沿展向（z 方向）流场特征量分布规律

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

实验采用单丝热线探针测量，与条缝所在平面距离始终保持 5mm。起始点正对一个条缝中心，步长 1mm 自上游至下游测量，共测量 70 个空间点。图 4（a）、（b）分别为简化模型和七排座舱模型平均速度场。可以看出：流场具有明显的周期性，且周期与条缝周期相同（7mm），只是七排座舱模型的射流 Re 数较大。



（a）

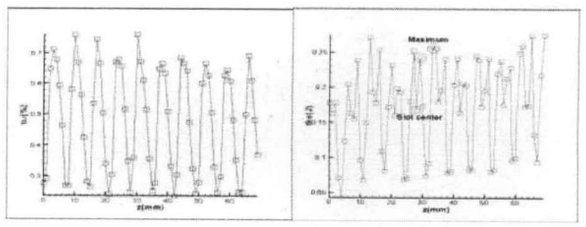


（b）

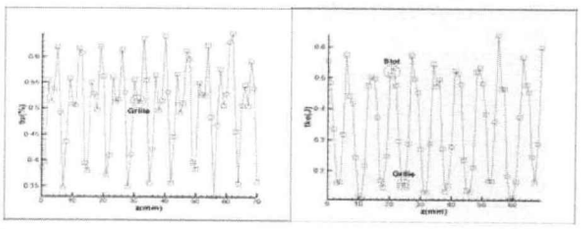
图 4 （a）（b）简化模型和七排座舱模型平均速度场

Fig.4 (a) (b) Mean velocity field of the simplified and 7-rows aircraft cabin model

图 5（a）、（b）、（c）、（d）分别表示简化模型的湍流度与湍动能，以及七排座舱模型的湍流度与湍动能沿展向的变化规律。湍流度与湍动能都是表征脉动强弱的物理量，但是湍动能表征的是绝对的脉动强度，对于简化模型可以看出在背景湍流度不大的情况下湍动能的最大值并不在条缝中心处，而是在条缝中心和格栅中心之间的某个点上，这是因为沿展向（z 方向）出了核心区，脉动强度会变大。与简化模型相比，从七排座舱模型的湍动能分布图中可以看出其最大值出现在条缝中心附近，这说明七排座舱模型的背景湍流度较大，流动更为复杂。由于湍流度是脉动强度与平均速度的相对值，其在格栅处并不是最大值，表明沿展向（z 方向）从条缝到格栅平均速度的衰减比湍动能的衰减更为明显。



（a） （b）



（c） （d）

图 5 （a）（b）简化模型湍流度和湍动能；（c）（d）七排座舱模型湍流度和湍动能

Fig.5 (a) (b) Turbulence intensity and turbulent kinetic energy of the simplified aircraft cabin model ; (c) (d) Turbulence intensity and turbulent kinetic energy of the 7-rows aircraft cabin model

2.2 沿流向（x 方向）流场特征量分布规律

利用单丝热线探针分别测量正对条缝中心和相邻格栅中心沿流向的衰减，起始位置距离壁面 5mm，步长 5mm 测量 11 个点（到 55mm），之后加大步长为 20mm 测到 175mm。图 6（a）、（b）分别为简化模型和七排座舱模型沿流向不同点的平均速度分布。可以看出两模型分别在 20mm 和 15mm 处条缝与格栅处的平均速度逐渐一致，格栅的形状扰动消失，即流场沿平行壁面方向分布不再具有周期性 。还可以看出二者都具有不同长度的水平段（35mm、40mm），在水平段末端前可认为是速度核心区。也可以清楚地看出沿流向七排座模型速度衰减得更快，这是由于主流方向向上偏转（附壁效

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

应)，附壁的程度不同取决于条缝与上壁的距离不同，和 Re 数的不同。

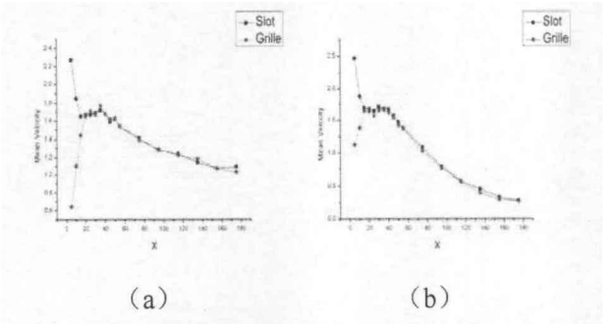


图 6 （a）（b）简化模型和七排座舱模型不同流向位置的平均速度

Fig.6 (a) (b) Mean velocity in different location along streamwise of the simplified and 7-rows aircraft cabin model

对七排座舱模型沿流向变化（正对条缝中心）的速度场进行谱分析，图 7（a）、（b）分别绘制了湍动能（对数坐标）变化规律以及能谱图。能谱图节选了 7 个不同流向位置。可以看出随着远离条缝湍动能在变小。-5/3 斜率标识的惯性子区的尺度范围随下游慢慢向大尺度一段移动，说明越向下游方向，含有和传递能量的区域越来越小，湍流脉动中大尺度动能在逐渐衰减[6-7]。由于惯性子区在 100hz 以上，也提示我们做大涡模拟时计算的时间步长不能大于 0.005 秒。

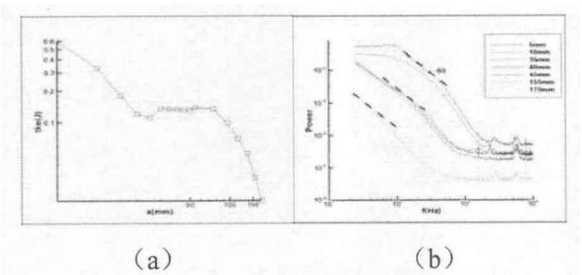


图 7（a）七排座舱模型不同流向位置的湍动能；（b）七排座舱模型不同流向位置能谱

Fig.7 (a) Turbulence kinetic energy in different location along streamwise of the 7-rows aircraft cabin model : (b) Turbulence energy spectrum in different location along streamwise of the 7-rows aircraft cabin model

2.3 射流偏转程度的刻画

利用双丝热线探针测量分别距离风口 5mm、10mm 流向（x 方向）与展向（z 方向）速度分布，刻画气流偏转角度。步长 1mm 测量 22 个点（3 个周期）。图 8（a）、（b）分别绘制了七排座舱模型距离风口所在平面 5mm、10mm 的速度合矢量分布规律。图中横坐标表示沿展向不同的位置，纵坐标代表矢量合速度的大小，箭头代表了矢量的方向，图上数字代表偏转角度。可以看出：速度场沿展向具有明显的周期性；射流并不是垂直于条缝所在平面射出，而是向下游偏转的，这由管道内静压与动压的相对大小决定；随着远离喷口速度矢量大小和方向都趋于一致（与前面分析一致）。

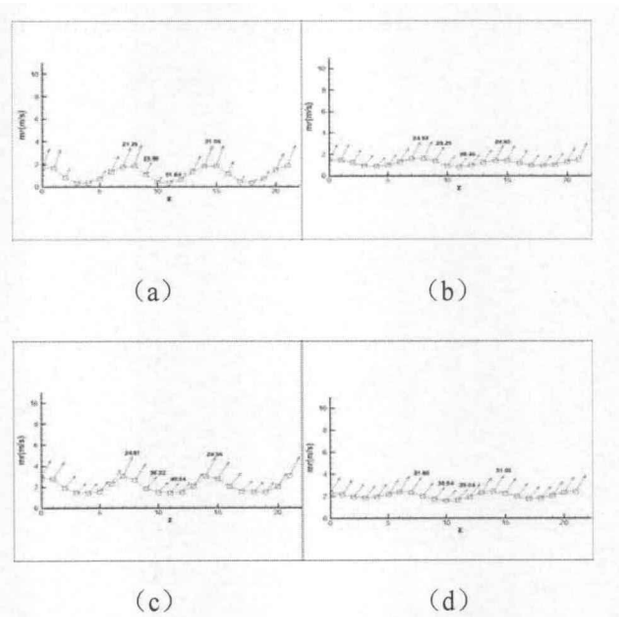


图 8 （a）（b）简化模型距离风口 5mm、10mm 速度矢量；（c）（d）七排座舱模型距离风口 5mm、10mm 速度矢量

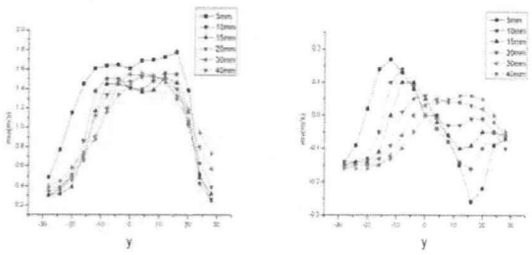
Fig.8 (a) (b) Velocity vector to slot outlet 5 mm and 10mm distance of the simplified aircraft cabin model ; (c) (d) Velocity vector to slot outlet 5 mm and 10mm distance of the 7-rows aircraft cabin model

2.4 不同流向位置的速度剖面

对于一个条缝利用双丝探针测量流向（x 方向）与法向（y 方向）速度分布。共测了六个截面，与条缝距离分别为 5、10、15、20、30、40mm，步长 4mm，每个截面测量 15 个点，测量过程中保持探

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

针与条缝距离不变。图 9（a）、（b）分别给出了简化模型六个截面的的流向平均速度以及法向平均速度。从图 9（a）中可以看出随着远离条缝平均速度在不断减小，且速度核心区宽度也越来越小；由于附壁效应，远离条缝的速度剖面会往右侧偏移，即速度会有向上偏移的趋势。从图 9（b）中可以看出所有法向速度都呈现反对称分布，在靠近条缝的断面上上侧速度为负，下侧速度为正，整体呈收缩趋势，这是由于在核心区内保持了出口时的特点（条缝相对于管道是截面突缩，即上下两侧压力比中间高）。随着向下游发展速度逐渐呈扩散趋势。

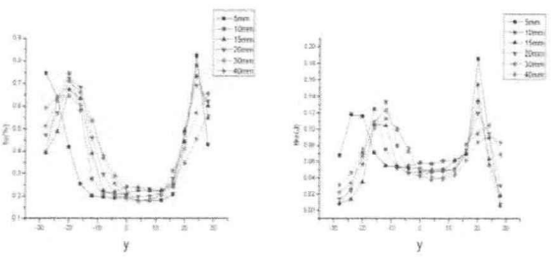


（a）　　（b）

图 9　（a）（b）简化模型不同流向位置流向和法向速度剖面

Fig.9　(a) (b) Streamwise and normal velocity profile in different location along streamwise of the simplified aircraft cabin model

图 10（a）、（b）分别绘制了简化模型舱内六个不同截面的湍流度和湍动能沿法向变化的规律。从图中可以清楚地看到：沿法向出了速度核心区脉动脉动强度会迅速变大，之后再衰减，这是背景湍流度不大的必然结果（较七排座舱模型）。

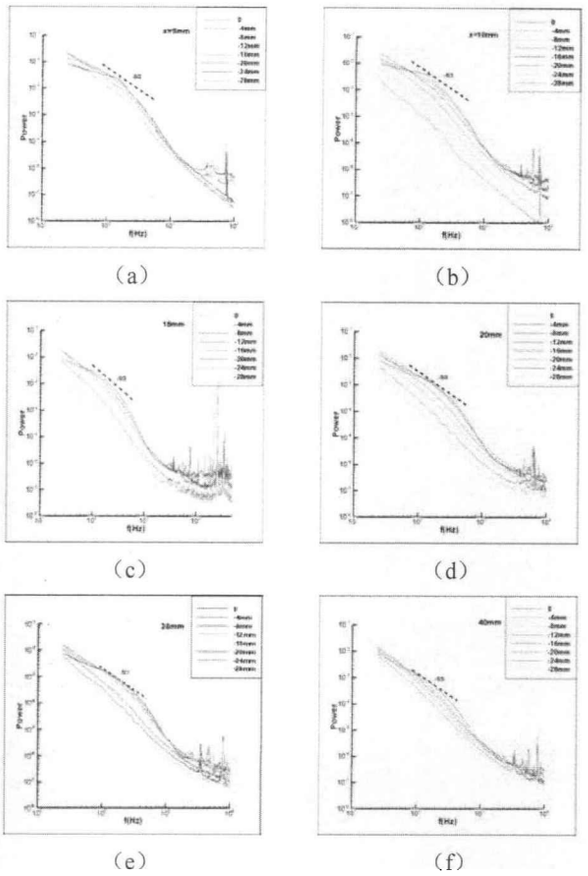


（a）　　（b）

图 10　（a）（b）简化模型不同流向位置湍流度和湍动能剖面

Fig.10　(a) (b) Turbulence intensity and turbulent kinetic energy profile in different location along streamwise of the simplified aircraft cabin model

图 11（a）、（b）、（c）、（d）、（e）、（f）分别给出了这六个不同截面能谱沿法向的变化规律。可以看出在每个断面上靠近中心的位置其脉动动能并不是最大的，但它所含有的的大尺度能量是最大的，即这种大尺度结构来源于背景湍流。随着远离条缝，从中心附近点的能谱变化可以看出大尺度的能量在不断减少，在同一截面上的能谱曲线形状变得越来越接近。



（a）　（b）　（c）　（d）　（e）　（f）

图 11　（a）（b）（c）（d）（e）（f）距离风口 5mm、10mm、15mm、20mm、30mm、40mm 处不同法向位置的能谱

Fig.11　(a) (b) (c) (d) (e) (f) Turbulence energy spectrum to slot outlet 5 mm、10mm、15mm、20mm、30mm and 40mm distance in different location along normal

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 讨论与结论

通过以上分析，可见两模型流场在近风口处沿展向都具有明显的周期性，这种周期性在离开壁面20mm （15mm）后会消失；多条缝射流存在一定长度的核心区，其规律与一般的射流理论相符；气流离开出口后由于附壁效应会不断地向上偏折；射流并不是垂直于条缝所在平面射出，而是向下游偏转的，这由管道内静压与动压的相对大小决定，它属于分流射流，不同于一般的静压或动压射流；对脉动速度进行能谱分析揭示了惯性子区的存在，随着远离条缝湍动能在变小，且湍流大尺度结构在不断的消亡。背景湍流所产生的大尺度结构比由于射流卷吸在混合层产生的大尺度结构还要多，这与一般情况下研究的射流不同。能谱的惯性子区在 100 hz 到 500 hz，提示进行大涡模拟时间步长不得大于0.005s，这样才能分辨出 100hz 的湍流成分。

参 考 文 献:

[1] Mi J and Nathan J. Statistical properties of turbulent free jets issuing from nine differently-shaped nozzles[J].Flow Turbulence Combust, 2010, 84(4): 583-606.

[2] Knowles K and Myszko M. Turbulence measurements in radial wall-jets. Experimental Thermal and Fluid Science, 1998, 17: 71-78 .

[3] 董志勇. 射流力学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[4] Liu W, Jiang N. Experimental investigation on mixing enhancement mechanism of turbulent jet flow with tabbed nozzle[J]. Transactions of Tianjin University, 200, 14(3): 164-172.

[5] Liu X, Jiang N. Passive control of turbulent jet flow with wedged nozzle[J]. Chinese J Chem Eng, 2005, 13(4): 451-456.

[6] Nickles B and Marusic I. On the different contributions of coherent to the spectra of a turbulent round jet and a turbulent boundary layer[J]. Journal of Fluid Mechanics，2001，448：367-385.

[7] 王 维, 姜 楠, 曹晓东, 沈 忱, 刘俊杰. MD-82 飞机客舱环境流场的 HWA 测量与分析. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(1): 2-7.

HWA measurements and analysis of jet flow field issued from aircraft cabin slot outlet model

Guo Yong[1]，Yao Shiyong[1]，Jiang nan[1,2,3]

(1. Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300072, China;

3. The State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The slot turbulent jet flow in the simplified and 7-rows aircraft cabin model environment are finely measured by constant-temperature anemometry system. Mean velocity, turbulence intensity, turbulence kinetic energy distributions and turbulence energy spectrum are analyzed. The results of the mean velocity show that the flow field near the slot outlet is mostly periodic along the spanwise, the periodicity will disappear when leaving a certain distance from the slot outlet.and the slot turbulent jet flow field has potential core region with a certain length along the streamwise. Turbulence intensity and turbulence kinetic energy evolutions indicate that the degrees of fluctuations are the result of the superimposition of many fluctuations with different scales. The turbulence energy spectrum shows that the inertial sub-range exists. The energy from the large scale is reduced constantly with the flow developing downstream and cascaded to the small scale through the inertial sub-range, which is finally dissipated into heat.

Key words: slot turbulent jet ; hot-wire anemometry; turbulence energy spectrum; aircraft cabin model

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net