

文章编号 1004-924X(2014)10-2627-06

二维点列式激光多普勒法测量物体速度

李秀明*, 黄战华, 李翔宇, 张昊, 龙宁波

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:提出了一种二维点列式激光多普勒测量方法,用于捕捉轨迹有一定波动范围的空间运动物体的速度信息。该方法使衍射光栅产生的多束相干光在空间某探测位置相交,从而形成一个结构可调的二维探测体阵列。当物体轨迹的波动量在二维阵列范围内时,系统即可以获得其速度信息。与扩展光束型的多普勒测速系统相比,该方法具有空间分辨率高及能量集中等优点,因此可以用于远距离探测。另外,对固体表面散射光的多普勒信号进行了分析及模拟。结果表明:测量结果与模拟结果相一致,且经频谱校正后的平均误差可以达到1.63%。该系统结构易于集成,调节方便,适用于轨迹有一定波动量的空间物体的速度测量。

关键词:激光多普勒测速仪;速度测量;二维点列;轨迹波动

中图分类号:TN247;TH824 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142210.2627

Two-dimensional point laser Doppler velocimeter for velocity measurement

LI Xiu-ming*, HUANG Zhan-hua, LI Xiang-yu, ZHANG Hao, LONG Ning-bo

(Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology of the Ministry of Education,
College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: lixiuming@tju.edu.cn

Abstract: A two-dimensional point Laser Doppler Velocimeter (LDV) is proposed for the velocity measurement of solid objects with a certain trajectory fluctuation. The arrangement uses several coherent beams generated by the same ruled diffraction gratings to form a two-dimensional detecting region with several groups of measuring volume array. The structure of the detecting region is adjusted manually in terms of the specific measuring conditions. When object trajectory fluctuation does not exceed the detecting region, the system effectively detects the velocities of objects. As compared to the beam expanded differential LDV, this type of instrument has a higher spatial resolution due to its small measurement volume. In addition, the system concentrates its energy upon the detecting point instead of the whole area, so it is more suitable for remote detection. The signal of scattered lights from the solid object is also analyzed and simulate. Experimental results indicate that the measurement result is in agreement with the simulated one, and the mean error of velocity is 1.63% by using the frequency spectrum correction algorithm. The presented system has a potential for realizing the

收稿日期:2014-01-14;修订日期:2014-03-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61275009);教育部博士点基金资助项目(No. 20110032120059);天津市高等学校科技发展计划资助项目(No. 20130711)

velocity measurement of spatial objects with a certain trajectory fluctuation.

Key words: laser Doppler velocimeter; velocity measurement; two-dimensional point; trajectory fluctuation

1 引言

激光多普勒测速仪(Laser Doppler Velocimeter, LDV)是一种非接触式测量仪器,具有测量精度高及线性度好等优点,因而广泛应用于测量气体、液体及固体的速度和振动^[1-3]。常见的激光多普勒测速系统分为参考光束型及差动双光束型两种^[4]。其中,差动双光束系统的应用比较广泛,因为该系统探测到的多普勒频移与接收散射的光方向无关,因此可以根据实际系统结构的需要来设计光学接收装置的位置;同时,对于远距离探测可以使用相对口径大的接收透镜来增加散射光功率。

双光束激光多普勒测速系统常用来测量固体表面的速度^[5]。由于系统的探测体积相对较小,因此被测固体表面的波动要控制在一定的范围内,如固定转子转速的测量^[6],工业生产中钢体表面的速度测量等^[7]。但是在一些相对较开放的应用场合中,被测物体不受固定装置的约束,所以其轨迹的扰动量也相对较大,如高速飞行的弹丸等。因此,对于这些物体表面波动量较大的测量场合,传统的双光束 LDV 将不再适用。为了扩大 LDV 的探测范围,Satoru、周健等人提出了多点分层差动 LDV^[8-9],此类系统采用多个探头并依次分层分布,扩大了其纵向上的探测范围;但探测范围越大所需要的探头就越多,这不仅使系统过于繁琐,还增加了成本。Sriram, Grant 等人提出了扫描型 LDV^[10-11],该系统通过光束的扫描来实现探测体在某一方向上的移动,进而扩大测量范围;但由于该系统是通过机械装置运动来改变光束的汇聚点位置,因此其动态响应以及扫描速度等无法满足高速测量的需求。Koichi 等提出了一种基于可调谐激光器的轴向扫描系统和垂轴扫描系统^[12-14],它们采用波长可调的激光器以及衍射光栅等器件,通过改变激光波长来改变双光束的汇聚角,进而使探测体在指定方向上进行扫描。

空间运动物体轨迹的波动量是二维的,而上

述 LDV 仅在一维方向上扩大了探测范围。文献[15]讨论了一种扩展光束型 LDV,其探测区域在两个方向上同时得到了扩展。但探测体扩大导致的空间分辨率降低及光束扩展导致的能量在整个探测区的均匀分布,致使该系统不适合高精度及远距离的探测。因此,本文提出了一种二维点列式 LDV,该系统的探测区域由多组探测体阵列构成。该结构探测体的分布排列避免了能量的浪费,同时较小的探测体还提高了系统的空间分辨率,改善了接收信号的信噪比,从而为远距离、高精度探测提供了保证。

2 测量原理

2.1 光学系统结构

多点式 LDV 的测量光路如图 1 所示。激光束经分光镜组后产生多束光强近似相等的平行相干光,然后将平行光束投射到透射光栅组并产生多级衍射光,最后利用可调节反射镜组将衍射光汇聚到探测区域。从图 1 中可以看出,探测区中探测体成组排列,每组之间不发生干涉,并且在实际测量中可通过调节分光镜组的间距来改变组间距。当有物体穿过探测区时,后向收集透镜将物体表面反射的散射光汇聚到探测器表面,散射光在光敏面上干涉产生多普勒信号。输出信号的频移为:

$$f_d = 2 \sin \alpha \cdot v / \lambda, \quad (1)$$

其中: α 为光束汇聚半角, v 为物体在垂直于相交

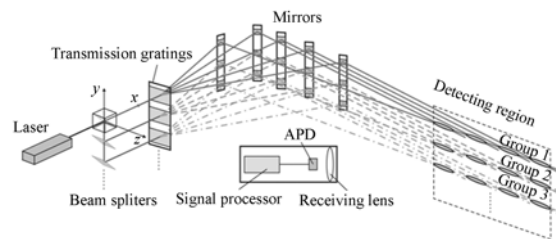


图 1 多点式激光多普勒测速系统光路简图

Fig. 1 Schematic diagram of optical arrangement of multi-point laser Doppler velocimeter

光束角平分线方向的速度分量。然后,信号经处理器滤波放大并采集。最后,将采集的信号传输到上位机进行计算及显示。系统散射光的接收装置采用分离集成方式,可根据实际测量环境来改变接收位置。

系统探测区结构如图 2 所示,其长度 L_z 与单个探测体长度 $l = d_e / \sin \alpha$ 有关^[4],其中 d_e 为光束在相交位置的直径。探测体宽度 L_y 与被测物体截面宽度 d 及探测体组数有关(位置 P_3, P_4)。通常,为确保物体经过探测区内任意位置时都有信号产生,探测体组间距 $\delta \leq d$,如图中 P_2 所示;同时每组中相邻两探测体之间有一重叠部分,因此有:

$$L_z \leq n \cdot l, \quad (2)$$

$$L_y \leq m \cdot d, \quad (3)$$

式中: n 为每组中探测体的数量, m 为探测体组数。当物体表面的波动量小于该探测范围时,能够确保探测信息不会丢失。并且,根据实际物体运动轨迹的扰动量可以增加或减少探测体的个数,从而满足不同测量的要求。

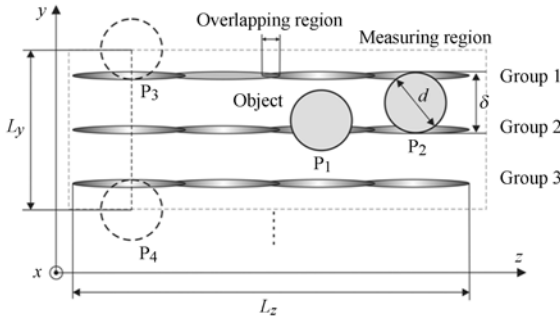


图 2 探测区结构图

Fig. 2 Configuration of detecting region

2.2 信号分析

当单个粒子穿过测量体时,光检测器中产生的光电流 $i(t)$ 为^[4]:

$$i(t) = i_d \exp\left\{-\left[\frac{2\sqrt{2}(t-t_0)}{\tau}\right]^2\right\} + i_a \exp\left\{-\left[\frac{2\sqrt{2}(t-t_0)}{\tau}\right]^2\right\} \cos[2\pi f_d(t-t_0)], \quad (4)$$

式中: $\tau = N_f / f_d$ 是粒子穿过测量体的有限渡越时

间; N_f 是测量体中的条纹数; t_0 是粒子到达时刻; f_d 是反映粒子速度的多普勒频率; i_d, i_a 分别是基底信号及检测信号的最大幅度,如图 3(a) 所示。根据条纹模型^[6],多普勒信号被解释为散射粒子穿过两束光相交区内部一组条纹时的速率,如图 3(b) 所示。粒子速度表示为: $u = r / (t - t_0)$, r 为粒子截面上一点的位置。那么粒子穿过条纹区域时光强变化的频率(多普勒频率)为: $f_d = u / \Delta x = r / (t - t_0) \Delta x$, Δx 为探测体内的条纹间距。将该频率代入式(4)可得:

$$i(t) = i_d \exp\left[-\left(\frac{2\sqrt{2}r}{N_f \Delta x}\right)^2\right] + i_a \exp\left[-\left(\frac{2\sqrt{2}r}{N_f \Delta x}\right)^2\right] \cos\left(\frac{2\pi}{\Delta x} r\right). \quad (5)$$

式(5)为粒子截面上任意一点的散射光强表达式,那么整个粒子截面的散射光强为:

$$i(t)_s = \Gamma \zeta_s \cdot \int_{-r_p}^{r_p} i_a \exp\left\{-\left[\frac{2\sqrt{2}}{N_f \Delta x}(r_c + \rho)\right]^2\right\} \cdot \left\{\frac{i_d}{i_a} + \cos\left[\frac{2\pi}{\Delta x}(r_c + \rho)\right] d\rho\right\}, \quad (6)$$

式中: r_c 给出了散射粒子的中心位置; r_p 为截面半宽度,整个信号的强度由高斯光束的强度调制; Γ 表示粒子截面的反射率, ζ_s 表示探测器接收散射光的比例因子。这里假设粒子截面为方形,该假设不影响计算结果。

如图 2 所示,当固体穿过探测体时,将固体表面看成是由大量粒子组成的,因此总的散射光强表示为所有粒子散射光强的和,应用式(6)可得探测器接收固体表面的散射光强为:

$$i_{\text{total}} = \Gamma \cdot \sum_{j=1}^N \zeta_s \int_{-r_p}^{r_p} i_a \exp\left\{-\left[\frac{2\sqrt{2}}{N_f \Delta x}(r_c + \rho)\right]^2\right\} \cdot \left\{\frac{i_d}{i_a} + \cos\left[\frac{2\pi}{\Delta x}(r_c + \rho)\right] d\rho\right\}, \quad (7)$$

式中: N 代表粒子的个数。对式(6)给出的多普勒信号进行数值模拟,模拟结果如图 3(c) 和 3(d) 所示。图 3(c) 表明固体表面(多粒子)反射的多普勒信号与单个粒子的信号形式相似,都是由高斯基底信号及振幅呈高斯分布的多普勒信号构成,只是对比度相对较低。该信号滤波后的结果如图 3(d) 所示。

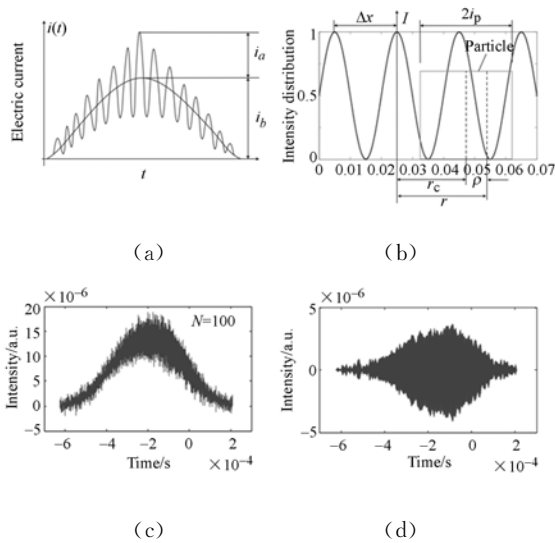


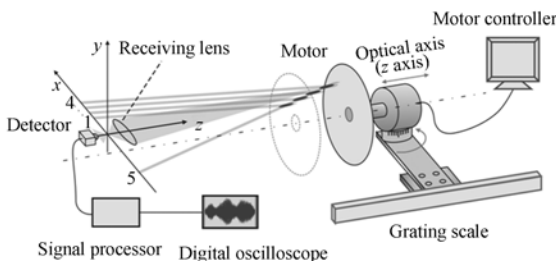
图 3 (a)单粒子信号电流;(b)条纹模型;(c)粒子数 $N=100$ 时的多普勒信号数值模拟结果;(d)滤除(c)中高斯基底的多普勒信号

Fig. 3 (a) Electric current of single particle; (b) Fringe model; (c) Simulated result of Doppler signal with $N=100$; (d) Filtered result of (c)

3 实验与分析

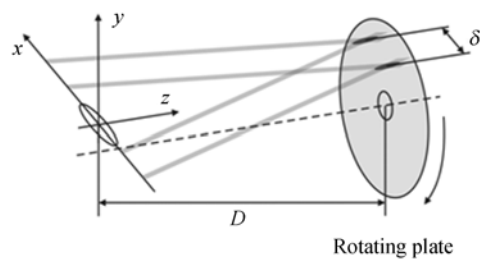
图 4(a)为测量区域任意一组探测体测量的实验装置。经光栅衍射的多束相干光在空间某一位置相交,形成一组探测体阵列。电机与光栅尺相连,可以在探测区内沿 z 轴方向任意调节电机位置(相当于图 2 中物体在任意位置 P_1)。通过控制器可以实时调节电机的转速并在上位机上显示。当转盘经过探测区时,载有多普勒频移的散射光被收集透镜汇聚到探测器表面形成多普勒信号。最后,探测器输出的信号经信号处理器放大滤波后,采集传输给上位机。

实验采用波长为 532.8 nm 的固体激光器,相交光束的夹角为 9.56° 。相交位置的光束直径



(a)任意一组探测体测量

(a) Measurement setup of a set of volumes



(b)转盘与两个探测器体同时接触

(b) Rotator passing through two probe volumes

图 4 实验装置

Fig. 4 Experimental arrangement

及各探测体的长度如表 1 所示。表 1 中相干光束的直径并不严格相等,因此应用公式 $l = d_c / \sin \alpha$ 计算探测体长度时,取较小的直径来近似计算。

表 1 实验参数

Tab. 1 Parameters of experiment (mm)

个数	光束直径	探测体长度
1	2.53	30.37
2	2.47	29.65
3	2.49	29.89
4	2.45	29.41
5	2.56	

在探测区域内沿 z 轴调整电机的位置,并通过控制器改变电机转速,从而获得不同位置上电机转速的测量结果,如图 5 所示。图中给出了转盘的真实速度以及实际测得的速度。同时,为了提高测量精度,这里对实测信号的频谱进行了修正^[17],并将修正后的结果一同绘制在图 5 中。频谱校正后的平均误差为 1.63%。

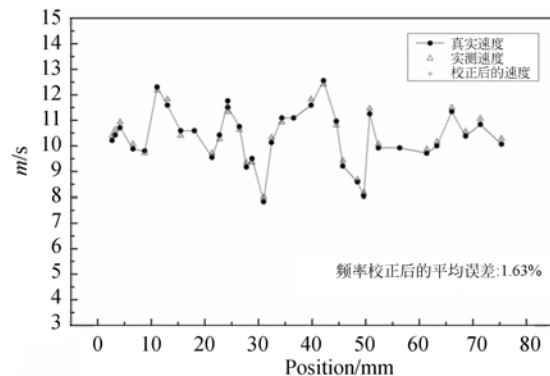


图 5 电机转速测量结果对比

Fig. 5 Comparison of experimental results of motor rotating speeds

如图 2 所示,当物体在探测区 P_2 处时,物体表面同时与两个探测点接触。因此,这两个位置的散射光会同时汇聚到探测器表面并叠加,叠加的两个信号之间相差一个固定的相位 φ ,该相位

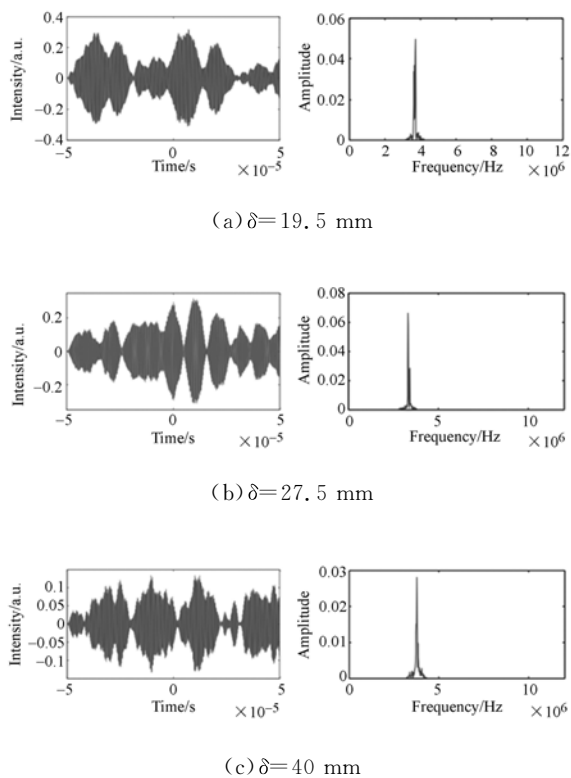


图 6 不同 δ 情况下的信号对比

Fig. 6 Comparison of Doppler signals with different δ

参考文献:

- [1] FEKE G T, RIVA C E. Riva laser Doppler measurements of blood velocity in human retinal vessels [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, 68(4):526-531.
- [2] 刘昌文,程文明,刘杰. 二维计数跟踪型激光多普勒测速系统的智能化及其应用[J]. *光学精密工程*, 2002,10(6):639-643.
- LIU CH W, CHENG W M, LIU J. Intelligent control and application of two-dimensional counting-tracing LDA measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(6): 639-643. (in Chinese)
- [3] 武颖丽,吴振森. 基于希尔伯特变化的微小振动激光多普勒信号处理[J]. *中国光学*, 2013,6(3):415-420.
- WU Y L, WU ZH S. Micro-vibration laser Doppler signal processing based on Hilbert transform [J].

与探测体组间距 δ 及散射光接收的距离有关。如图 4(b)所示,让转盘同时与两个探测体接触,并固定接收距离 D ,在其它条件不变的情况下,改变两探测体间距 δ ,测得的多普勒信号如图 6 所示。将多普勒信号看作是各态历经的随机过程,因此用信号的均方根来估算信号强度。图中 δ 分别为 19.5, 27.5 及 40 mm 时,均方根分别为 0.123 3, 0.113 5 及 0.050 2,说明随着 δ 的增大,信号的强度虽然减小,但其对比度却没有明显变化,不影响多普勒频移的提取,因此适当调节间距 δ 可以满足不同尺寸物体的测量。另外,图 6 的实验结果与图 3(d)中的模拟结果相一致,由此表明该方法可以有效地测量固体表面的速度。

4 结 论

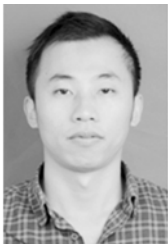
本文提出了一种二维点列式激光多普勒测速系统。该系统的二维探测区域由多组探测体阵列按一定结构排列而成,因此可以有效地捕捉轨迹在一定范围波动的空间运动物体的速度信息。本文对固体表面散射光的多普勒信号进行了分析及数值模拟。实验结果表明:实际测得的多普勒信号与数值模拟结果相一致,且经过频谱校正后的平均误差可以达到 1.63%。与扩展光束型多普勒方法相比,该方法具有空间分辨率高、能量集中等优点,因而适合远距离探测。

Chinese Optics, 2013, 6(3): 415-420. (in Chinese)

- [4] 沈熊. 激光多普勒测速技术及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- SHEN X. *Laser Doppler Velocimetry and its Application*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [5] QUERCIOLI F, MANNONI A, TIRIBILLI B. Laser Doppler velocimetry with a compact disc pickup [J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37(25): 5932-5937.
- [6] JIAN Z, XING W L. Laser Doppler velocimeter using a single longitudinal mode solid-state laser source [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2010, 42:1167-1171.
- [7] TRUAX B E, DEMAREST F C, SOMMARGREN G E. Laser Doppler velocimeter for velocity and length measurements of moving surfaces [J]. *Appl. Opt.*, 1984, 23(1): 67-73.

- [8] SATORU K, TADASHI I, HIROSHI I, *et al.*. Multipoint sensing laser Doppler velocimetry based on laser diode frequency modulation [C]. *Eleventh International Conference on Optical Fiber Sensors, Japan: Japan Society of Applied Physics*, 1996: 606-609.
- [9] 周健, 龙兴武. 多点分层差动激光多普勒自身测速仪的研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(7):1837-1844. ZHOU J, LONG X W. Research on multipoint layer-type laser Doppler self-velocimeter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(7):1837-1844. (in Chinese)
- [10] SRIRAM P, HANAGUD S, CRAIG J, *et al.*. Scanning laser Doppler technique for velocity profile sensing on a moving surface [J]. *Appl. Opt.*, 1990, 29(16):2409-2417.
- [11] GRANT G R, ORLOFF K L. Two-color dual-beam backscatter laser Doppler [J]. *Appl. Opt.*, 1973, 12(12):2913-2916.
- [12] KOICHI M. Axial scanning laser Doppler velocimeter using wavelength change without moving mechanism in sensor probe [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(7):5960-5969.
- [13] KOICHI M, TAKAHIRO H. Nonmechanical axial scanning laser Doppler velocimeter with directional discrimination [J]. *Appl. Opt.*, 2012, 51(20):4783-4787.
- [14] KOICHI M, TOSHIKI F, RYUSUKE I. Nonmechanical transverse scanning laser Doppler velocimeter using wavelength change [J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(32): 6121-6127.
- [15] 李秀明, 黄战华, 朱猛. 扩展光束型激光多普勒速度测量系统[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1102-1109. LI X M, HUANG ZH H, ZHU M. Differential laser Doppler system with expanded beams for velocity measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5):1102-1109. (in Chinese)
- [16] F. 杜斯特, A. 梅林, J. H. 怀特洛. 激光多普勒测速技术的原理和实践[M]. 第二版:北京:科学出版社, 1992. DURST F, MERLIN A, WHITELAW J H. *Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry* [M]. Second edition. Beijing: Science Press, 1992. (in Chinese)
- [17] 丁康, 谢明, 杨志坚. 离散频谱分析校正理论与技术[M]. 北京:科学出版社, 2008. DING K, XIE M, YANG ZH J. *The Theory and Technology of Discrete Spectrum Correction* [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)

作者简介:



李秀明(1985—),男,吉林长春人,博士研究生,2009年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光学测量方面的研究。E-mail: lixiuming@tju.edu.cn

导师简介:



黄战华(1965—),男,湖北孝感人,博士,教授,1986年于华中科技大学获得学士学位,1989年、1992年于天津大学分别获得硕士和博士学位,主要从事光电图像处理与模式识别、光电子信息技术及多媒体计算机应用与控制的研究。E-mail: zhanhua@tju.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)