

气液两相涡街稳定性的研究¹⁾

李永光

(华东工业大学热工程与空调研究所, 上海 200093)

林宗虎

(西安交通大学能动学院, 西安 710049)

摘要 通过气液两相涡街试验研究和理论分析, 首次得出了当有稳定的气液两相涡街发生时, 气液两相涡街结构参数的取值及变化规律.

关键词 卡门涡, 气液两相流, 稳定性

前 言

涡街是流体绕流的一种特殊现象, 也是尾迹流动中的一种典型旋涡结构, 卡门 (T. Von Karman)^[1]首先对其进行了稳定性分析, 因而得名卡门涡街.

对单相流体涡街稳定性问题, 已有了较多研究^[2], 但对气液两相涡街稳定性问题, 目前, 在国内外还是研究空白. 随着工业技术的发展, 特别是大型电站和核电站的发展, 气液两相绕流工况常可遇到, 气液两相涡街也时常发生, 研究气液两相涡街对这些电站中设备的安全运行有很重要的意义. 此外, 70 年代初, 利用单相流体涡街的特性制成了单相流涡街流量计. 这种流量计以其独特的优点, 并兼有其它流量计的许多优点, 受到普遍欢迎, 应用范围极广. 而气液两相涡街的许多特性也与气液两相混合物流量和组分有关. 能否利用气液两相涡街特性进行气液两相流流量和组分的测量, 不仅在气液两相流测量理论上有很重要的意义, 而且在工业实际有重要的实用价值. 要利用气液两相涡街进行气液两相流流量和组分的测量, 气液两相涡街稳定性的研究是极其重要的.

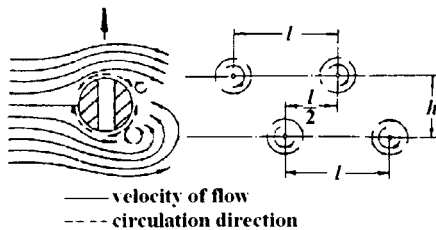


图 1 涡街示意图

Fig. 1 Vortex street sketch map

卡门得出单相流涡街稳定的必要条件为 $h/l = 0.2805$, 其中 h 是涡街间的距离, l 是同一列旋涡中相邻旋涡之间的距离, 见图 1. 若称 h/l 为涡街结构参数, 则实验观察到单相流涡街结构参数 $h/l = 0.2805$, 大部分偏大, 但值相近. 对于气液两相涡街结构参数 h/l 怎样取值? 与哪些因素有关? 至今国内外均还没有人研究. 本文对气液两相涡街的稳定性问题进行

了研究, 得出了当有稳定的气液两相涡街发生时, 气液两相涡街结构参数 h/l 的取值. 试验条件如下: 工质为水, 空气; 温度为室温; 压强为相对压强 $0.0 \sim 0.2 \text{ MPa}$; 水流量为 $0.0 \sim 26 \text{ m}^3/\text{h}$; 截面含气率为 $0.0 \sim 0.40$; 两相流型为细泡状; 试验管子直径为 50 mm .

¹⁾国家自然科学基金和动力工程多相流国家重点实验室开放基金资助项目.

1996 - 07 - 01 收到第一稿, 1997 - 03 - 21 收到修改稿.

1 试验系统

涡街发生体形状如图 2 所示. 试验工质由已测定流量的水及空气分别送入混合器形成混合物后送入试验管段,其总体装置图见文献[3].

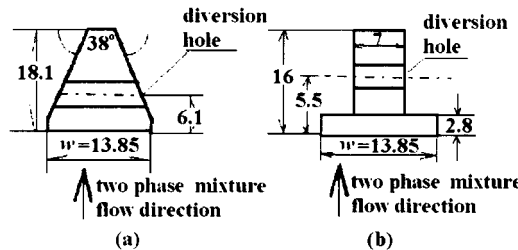


图 2 涡街发生体 ((a) AI 型; (b) BI 型)

Fig. 2 Vortex emission body ((a) AI model; (b) BI model)

1.1 两相旋涡的检测

每当物体两侧交替产生旋转方向相反的旋涡时,物体就交替地受到两个方向相反的力,例如,当物体下方有旋涡产生时,作为旋涡旋转运动的反作用,在物体的其它部分产生与旋涡方向相反的旋转,此旋转为物体周围的环流,也即环量.若物体下方的旋涡是逆时针方向旋转,则物体上方速度将大于下方速度,而物体上方压力则小于下方压力,若在物体中开一上下贯通的小孔,则小孔中便会有流体自下而上流动,如果旋涡是在物体上方顺时针方向旋转,那么上述结果相反,将有流体自上而下地流经小孔.小孔中流体流动方向每改变一次,就表示物体的某一侧有一旋涡脱落.在小孔内安装敏感元件热敏电阻,仪表电路提供的恒定电流将热敏电阻元件加热到高于被测介质的温度,小孔中往复流动的流体介质会对热敏电阻进行冷却,使电阻值发生变化,从而热敏电阻两端电压也发生变化,此电压变化信号经过放大、滤波、触发整形等环节,输出二次仪表所需的矩形脉频信号,如图 3 所示,此信号与管道内旋涡同步同频,信号处理电路如图 4 所示.热敏电阻阻值随温度升高而降低,可用下式表示

$$R_T = A e^{B/T} \tag{1}$$

式中, T 为绝对温度, K; R_T 为温度 T 时的电阻. A , B 为与温度无关,由材料成份及结构决定的常数, A 具有电阻量纲, B 具有温度量纲, K.

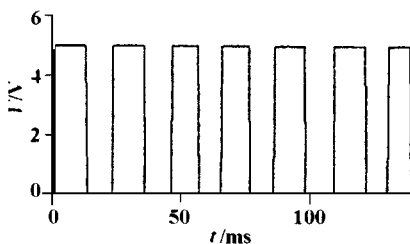


图 3 矩形脉冲频率信号

Fig. 3 Rectangle pulse frequency signal sketch

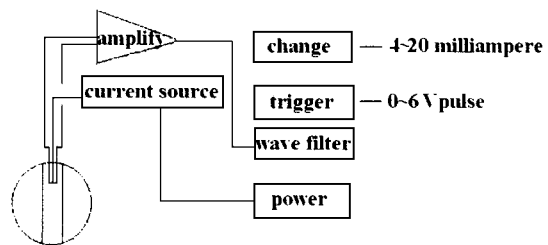


图 4 旋涡检测器电子系统简图

Fig. 4 Vortex detection circuit system sketch

在图 3 中,当电压是高电位时表示物体小孔中有流体流过,低电位表示小孔中没有流体流过,虽然此时物体的另一侧仍有旋涡脱落,但在本文中,小孔被设计成只能从一个方向流进,因此,一个高电位表示物体一侧的一个旋涡,而一个低电位表示物体另一侧的一个旋涡,当方波均

匀,即高电位与低电位的占空比相等时,物体后部尾流中有稳定的卡门涡街发生.这时从物体两侧交替地周期性地有旋涡脱落.

1.2 涡街结构的测量

气液两相旋涡与单相流体旋涡不同,由于液相流体中含有气泡,而旋涡中心压力相对旋涡外压力要低,在压差的作用下,质量较轻的气泡将会被吸入旋涡中,因而,在气液两相流旋涡中的含气量比旋涡外的要高,而且越靠近旋涡中心,含气量越高,许多研究者已经证实了这一现象.根据这一物理现象,设计了9针梳状电阻探针,如图5所示.该探针是由9根独立的电阻探针排列制成.电阻探针是根据水和空气的电阻值有明显差别的原理而设计的,每根探针的电路如图6所示,针尖由一根直径为0.3 mm的细绝缘金属丝制成.针尖是电路的一个极,另一个极为针杆,在此两极间加上7.5 V的直流电压,由于气体的电阻比液体的电阻大得多,当管道内全部是水时输出电压为最大,当管道内全部是空气时输出电压为最小,当气液两相交替流过电阻探针时,两极间电压就发生相应的变化,通过计算机采集下来的一路探针的电压变化波形如图7形示.设气泡流过探针的时间为 t_G , 气液两相流过探针的总时间为 t_T , 根据文献[7],

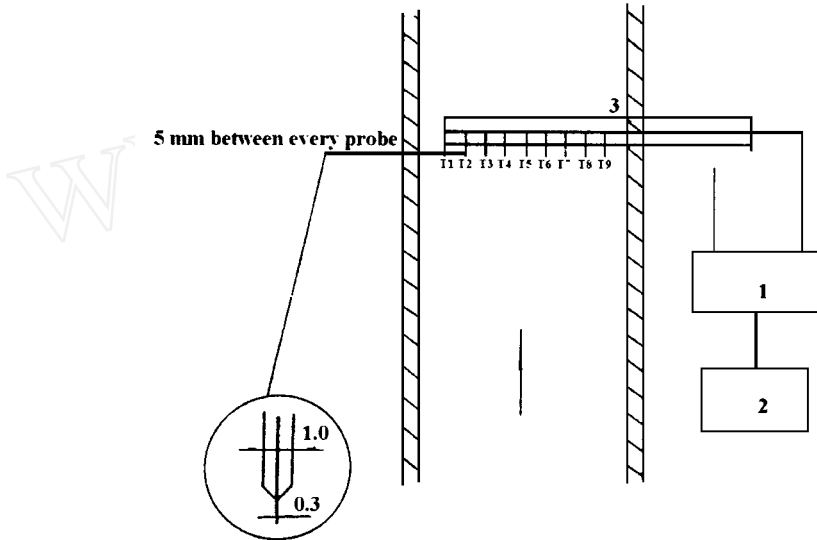


图5 梳状电阻探针
1—多通道信号处理电路;2—计算机;3—针杆

Fig.5 Comb type electric impedance probe
1—multipassage signal treatment circuit;2—computer;3—needle body

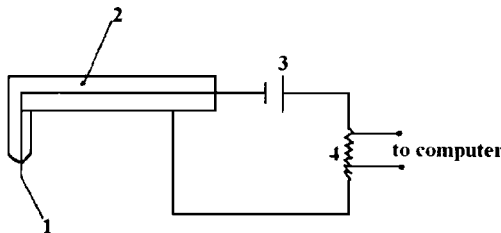


图6 单根探针的信号处理电路
1—针尖;2—针杆;3—7.5伏电池;4—可调电阻

Fig.6 Single probe signal treatment circuit
1—the point of a needle; 2—needle body;
3—7.5 V battery; 4—rheostat

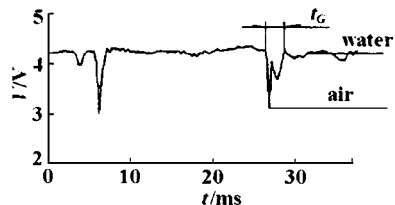


图7 电阻探针测得的信号
Fig.7 Detected signal by impedance probe

测点平均含气率 可按下式计算

$$\bar{\alpha} = \frac{t_G}{t_T} \tag{2}$$

探针可从管子上取下,以便清理针尖,保持良好的导电性.

2 气液两相涡街稳定性的试验研究和理论分析

利用上述试验系统,当有稳定的气液两相涡街发生时,利用 9 针电阻探针测得的涡街结构如图 8 所示. 设气液两相涡街间的距离 h 用下式表示

$$h = C_1 W \tag{3}$$

式(3)中, W 为涡街发生体迎流面宽度(见图 2), m . 在单相流中,对圆柱形物体,根据文献[8], $C_1 = 1.3$.

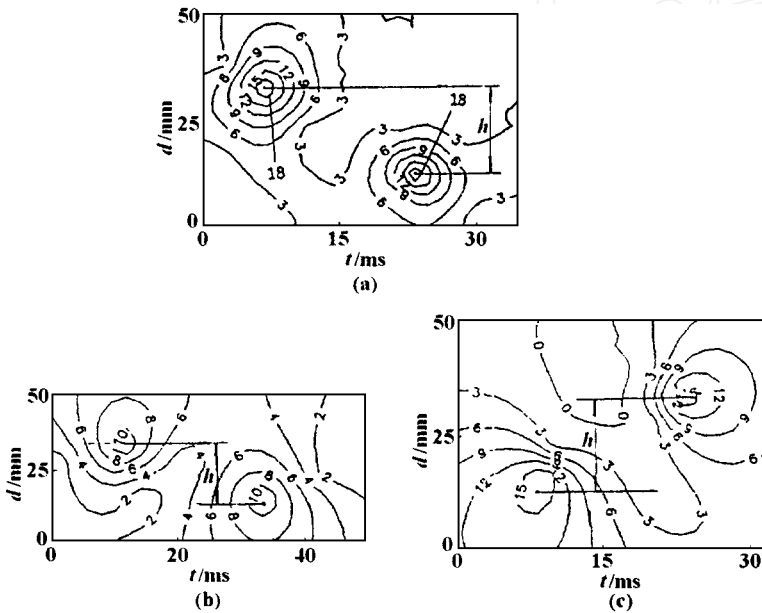


图 8 涡街中含气率分布检测结果,来流截面含气率 $\alpha = 4\%$
 (a) Al 型物体, $Q_L = 14.0 \text{ m}^3/\text{h}$; (b) Al 型物体, $Q_L = 10.0 \text{ m}^3/\text{h}$; (c) BI 型物体, $Q_L = 14.0 \text{ m}^3/\text{h}$

Fig. 8 The detected distribution picture of void fraction inside a vortex street, undisturbance fluid void fraction $\alpha = 4\%$

(a) Al model body $Q_L = 14.0 \text{ m}^3/\text{h}$; (b) Al model body $Q_L = 10.0 \text{ m}^3/\text{h}$; (c) BI model body $Q_L = 14.0 \text{ m}^3/\text{h}$

由图 8 可以看出, (a) ~ (c) 三个图中 $h = 19.4$, 根据式(3)和图 2, 在本文的试验条件下, $C_1 = 1.4$.

仿照单相流体研究涡街移动速度的方法,假设在气液两相流中,涡街移动速度 u_{TV} 用下式表示

$$u_{TV} = C_2 u_L = C_2 \frac{Q_L}{A(1 - \alpha)} \tag{4}$$

式中, u_L 为来流液相真实速度, Q_L 为来流液相流量, A 为管道流通面积, α 为来流截面含气率, C_2 为系数(在单相流体中根据文献[9], $C_2 = 0.92$).

这样同列旋涡中相邻旋涡之间的距离 l 为

$$l = \frac{u_{TV}}{f_t} \tag{5}$$

式中, f_t 为气液两相涡街频率.

由式(3) ~ (5)得

$$\frac{h}{l} = \frac{C_1 W f_t}{u_{TV}} = \frac{C_1 W f_t A (1 - \dots)}{C_2 Q_L} = \frac{C_1}{C_2} St_{TP} \tag{6}$$

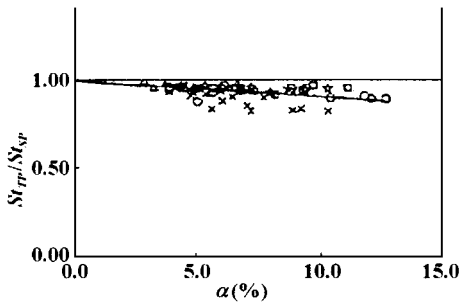
上式中, St_{TP} 为气液两相斯托拉赫数,表示为

$$St_{TP} = \frac{W f_t A (1 - \dots)}{Q_L} \tag{7}$$

若取 $C_2 = 0.92$, 则式(6)成为

$$\frac{h}{l} = \frac{1.4}{0.92} St_{TP} \tag{8}$$

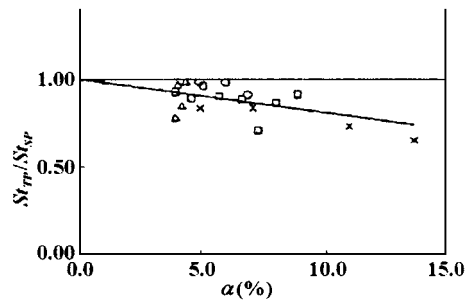
根据对图 2 所示的两种物体的试验研究,当气液两相流中有稳定的气液两相涡街发生时, St_{TP} 与试验值的关系可用图 9 和图 10 表示.



: $Q_L = 25.0 \text{ m}^3/\text{h}$; : $Q_L = 22.0 \text{ m}^3/\text{h}$;
 : $Q_L = 18.0 \text{ m}^3/\text{h}$; : $Q_L = 14.0 \text{ m}^3/\text{h}$;
 x: $Q_L = 10.0 \text{ m}^3/\text{h}$

图 9 混合物垂直上升流时 AI 型物体 St_{TP} 数与试验值的关系

Fig. 9 The relation picture of AI model bodel St_{TP} number and test value for gas-liquid mixture vertically upward flow



: $Q_L = 25.0 \text{ m}^3/\text{h}$; : $Q_L = 18.0 \text{ m}^3/\text{h}$;
 : $Q_L = 14.0 \text{ m}^3/\text{h}$; x: $Q_L = 10.0 \text{ m}^3/\text{h}$

图 10 混合物垂直上升流时 BI 型物体 St_{TP} 数与试验值的关系

Fig. 10 The relation picture of BI model bodel St_{TP} number and test value for gas-liquid mixture vertically upward flow

对图 9 和图 10 所示的关系曲线可统一写成下式

$$\frac{St_{TP}}{St_{SP}} = 1 - tg \tag{9}$$

式中, St_{SP} 为同一涡街发生体单相流体斯托拉赫数, tg 为与气液两相流动方向, 涡街发生体形状和涡街发生体特征尺寸与流道特征尺寸的比值(本文中取涡街发生体迎流面宽度与通道直径的比,即 w/d)有关,其取值见表 1.

根据式(9), 式(8)可以写成

$$\frac{h}{l} = \frac{1.4}{0.92} St_{SP}(1 - tg) \tag{10}$$

从式(10)可以看出,在气液两相流中,当有稳定的涡街发生时,涡街结构参数 h/l 不再象在单相流中是个常数,而是一个与来流截面含气率,涡街发生体形状和大小以及气液两相流动方向

表 1

Table 1

body shape	flow direction	$= W/d$	tg	St_{SP}	permitting contain maximum void fraction	steady term h/l
triangle (Al model)		0.277	1.110	0.247 8	$\leq 12\%$	$0.326\ 8 \leq h/l \leq 0.377\ 2$
"T" shape (Bl model)		0.277	1.948	0.236 5	$\leq 12\%$	$0.275\ 8 \leq h/l \leq 0.360\ 0$

note: (1) the maximum void fraction of permitting contain was obtained by writer in gas-liquid two phase vortex street experiment.

(2) St_{SP} is the single fluid Strouhal number.

(3) vertically upward flow.

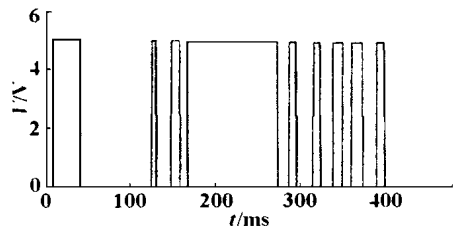
等有关的变量,其取值根据不同工况而变,见表 1。由式(10)还可以看出,当物体形状、大小,通道的尺寸以及流动方向一定时, h/l 只与来流截面含气率有关。由于气液两相流中旋涡的结构与含气率有关,因而其涡街的结构参数也与含气率有关。

由表 1 可以看出,在本文的试验条件下,当有稳定的气液两相涡街发生时, h/l 的取值在 0.275 8~0.377 2 之间。当 $> 12\%$ 时气液两相涡街开始变得不稳定。根据式(9)可得

$$St_{TP} = St_{SP}(1 - 0.12 \text{tg}) \quad (11)$$

涡街形成的机理很复杂,是目前还在研究和进一步认识的课题。在单相流中涡街稳定性与物体形状及流动雷诺数有关;气液两相涡街的稳定性,除与物体形状及流动雷诺数有关外,还与来流含气量有关。雷诺数太低旋涡不能获得足够的能量,无法使其稳定发展,形成不了稳定的涡街,若雷诺数太高,流体紊动增强,涡街将处于极容易失稳的状态,只要有微小的扰动涡街即失去稳定性。因此,在非常高的雷诺数下,也很难检测到稳定的涡街^[11]。

在气液两相流中,由于流体中含有气泡,因此,在物体后部将形成一个气团^[6],另外,在尾流的旋涡中,由于旋涡核心是个低压区,质量较轻的气泡将被吸入旋涡。因此,旋涡中心含气量要比旋涡外大得多(见图 8),物体后的气团、旋涡中的气泡量、旋涡外的气泡量、气泡的大小等都对旋涡有影响,使旋涡的结构改变。当来流含气量增大时,一方面,物体后部的气团变大,另一方面,旋涡内外的气泡量都增加。根据对单相流体的研究,当流体流过一非流线型物体时,其主要的能量损失是由于旋涡引起的,在旋涡中储存着许多能量^[10]。在气液两相流中,由于旋涡中吸入了气泡,而使得旋涡能量降低,由于能量的降低,旋涡强度将减弱,这会导致旋涡的不稳定。随着来流含气量的增加,旋涡中吸入的气泡量也增加,旋涡的能量会进一步降低。随着旋涡能量的降低,旋涡不再能吸入气泡,而在旋涡外的气泡,将对能量水平已降低,处于容易失稳状态的旋涡有扰动,加之物体后部气团的变大,这样一来,只要来流的含气量超过某一值后,涡街的稳定性即会被破坏。图 11 是 $= 16\%$ 时记录的矩形脉冲图,从图上可以看出这时物体两侧虽有气液两相旋涡脱落,但已不是稳定的气液两相涡街。从以上的分析可知,当流体中含有气泡时,较之单相流体更不易形成稳定的涡街。

图 11 $= 16\%$ 的矩形脉冲图Fig. 11 Rectangle pulse signal sketch ($= 16\%$)

当流体中含有气泡时,较之单相流体更不易形成稳定的涡街。

若将气液两相涡街开始失稳时的斯托拉赫数 St_{TP} 叫做临界两相斯托拉赫数并用 $(St_{TP})_s$ 表示, 则由式(13)可以看出, $(St_{TP})_s$ 与 tg 有关, 即与气液两相流动方向, 涡街发生体形状和涡街发生体特征尺寸与流道特征尺寸的比值有关. 在本文试验条件下, 对 A1 型物体 $(St_{TP})_s = 0.2148$, 对 B1 型物体 $(St_{TP})_s = 0.1812$.

3 结 论

在气液两相流中, 当有稳定的气液两相涡街发生时, 其涡街结构参数 h/l 与单相流的不一样, 不是一个常数, 而是一个与来流截面含气率有关的变数.

参 考 文 献

- 1 V. Karman T. Ueber den mechanismus des fluessigkeits und luftwiderstands. *Phys Zeitschrift*, 1912, 13: 49 ~ 59
- 2 Rosenhead L. Vortex Systems in wakes. *Advances in Applied Mechanics*, 1953, 3: 185 ~ 195
- 3 李永光, 林宗虎. 流动方向对三角形柱体气液两相涡街的影响. 华东工业大学学报, 1996, 18(4): 22 ~ 28
- 4 吴永生, 方可人编. 热工测量仪表. 北京: 水力电力出版社, 1983. 64
- 5 Hulin JP, Fierfort C, Condol R. Experimental study of vortex emission behind bluff obstacles in a gas liquid vertical two-phase flow. *Int J Multiphase Flow*, 1982, 8: 475 ~ 490
- 6 Yokosawa M, Kozawa Y, Inoue A, Aoki S. Studies on two-phase cross flow, Part III: Characteristics of unsteady flow behavior. *Int J Multiphase Flow*, 1986, 12(2): 185 ~ 202
- 7 林宗虎编著. 气液固多相流测量. 北京: 中国计量出版社, 1988. 215
- 8 川田裕朗, 小宫勤一, 山崎弘朗[日]编著. 流量测量手册. 1982. 304
- 9 Goldstein S. Modern Development in Fluid Dynamics. Oxford: Clarendon Press, Chap. 13
- 10 Lamb H. Hydrodynamics, 6th Edn. New York: Dover, 1945. Chap. 7
- 11 白莱文斯 RD[美]. 流体诱导振动. 北京: 机械工业出版社, 1983. 15

A STUDY ON THE STABILITY OF GAS-LIQUID TWO-PHASE VORTEX STREET¹⁾

Li Yongguang

(Shanghai Institute of Electric Power, 2103 Pingliang Road, Shanghai 200090, China)

Lin Zonghu

(Energy and Power Eng. College, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shanxi 710049, China)

Abstract Through test inspection and theoretical analysis, the value and the changing characteristics of the characteristic parameter (i.e. the ratio of the vortex street width to the distance between two vortices) of a steady gas-liquid two-phase vortex street was obtained for the first time.

Key words Karman vortex street, gas-liquid two-phase flow, stability

¹⁾ The project supported by the National Natural Science Foundation of China and the National Key Lab Foundation of Dynamical Engineering Multiphase Flow.

Received 1 July 1996, revised 21 March 1997.