

微机械惯性仪表综述*

Summarization for Micromechanical Inertial Instruments

南京航空航天大学自动控制系统(210016) 郭秀中

北京理工大学自动控制系统(100081) 陈家斌

【摘要】介绍了当前国外微机械陀螺仪和微机械加速度计的典型方案,并对其工作原理进行了简要的分析。

关键词:惯性传感器 微机械仪表 陀螺仪
加速度计

Abstract: The typical schemes of micromechanical gyroscopes and micromechanical accelerometers developed in some foreign countries are introduced. An analyzing for the principles is also given.

Key words: inertial sensor, micromechanical instruments, gyroscope, accelerometer

微机械惯性仪表是国外80年代发展的一种新型惯性仪表。它是在单晶硅或石英晶体上借助半导体加工工艺,制作陀螺仪和加速度计的微结构部件,并把相关的电子线路也集成在同一芯片上。这种微电子与微机械的结合,已经成为当前惯性仪表发展的一个重要方向,预计将会给惯性技术带来一次重大的变革^[1,2]。

微机械惯性仪表具有体积小(仅为几立方毫米)、重量轻(仅为数毫克)、功耗小(一般约为1W)、启动快(启动时间约为1s)、成本低(批量生产时可在10美元以内)、可靠性高(工作寿命长达10⁵h)、易于实现数字化和智能化等优点。预计所能达到的性能指标见表1和表2^[3]。

表1 微机械陀螺仪预计所能达到的性能指标

性能参数	预计指标
测量角速度的最大值	1000°/s
随机漂移率长期稳定性	10°/h
随机漂移率短期稳定性	1°/h
对加速度敏感的漂移率	1[(°)/h]/g
对线振动敏感的漂移率	0.4[(°)/h]/g ²
标度因数长期稳定性	2×10 ⁻⁴
标度因数短期稳定性	5×10 ⁻⁵
工作温度范围	-55~+85℃

表2 微机械加速度计预计所能达到的性能指标

性能参数	预计指标
测量加速度的最大值	70g
偏值误差长期稳定性	1.5×10 ⁻³ g
偏值误差短期稳定性	5×10 ⁻⁴ g
对线振动敏感的偏值误差	2×10 ⁻⁴ g/g ²
标度因数长期稳定性	3×10 ⁻⁴
标度因数短期稳定性	1×10 ⁻⁴
标度因数非线性	5×10 ⁻⁶
工作温度范围	-55~+85℃

从综合性能看,微机械惯性仪表特别适用于短时工作的战术武器(如战术导弹和智能炮弹等)的制导系统。随着工作精度的提高,可望与GPS全球定位系统组合构成导航系统。而且它在汽车、机器人、摄像机、油井钻探、机械装置、乃至生物医学和体育运动等领域均具有广阔的应用前景。

本文将综述目前国外研制的微机械惯性仪表的典型方案及其工作原理,希望能对我国这方面的研究工作起到推动作用。

1 微机械陀螺仪

微机械陀螺仪是利用振动质量在被基座带动旋转时的哥氏效应来感测角速度的,故实为振动式陀螺仪。根据振动构件的不同,有音叉振动式和框架振动式2种典型方案。

1.1 音叉振动式微机械陀螺仪

音叉振动式微机械陀螺仪采用石英晶体作为音叉的材料,并由化学蚀刻制成,然后再用激光修刻调整平衡。

图1所示为瑞典阿普萨纳(Uppsala)大学研制的单音叉振动式微机械陀螺仪^[4]。在这种方案中,音叉的基部仅仅作为支承,与仪表壳体相固连。在音叉双臂的表面上设置激振铬电极和读取电极,这些电极是在音叉表面先沉积一薄层铬再沉积一薄层金而成。音叉的激

* 本文为航空基础科学基金课题

振由石英晶体的逆压电效应实现,信号的读取由石英晶体的压电效应实现。

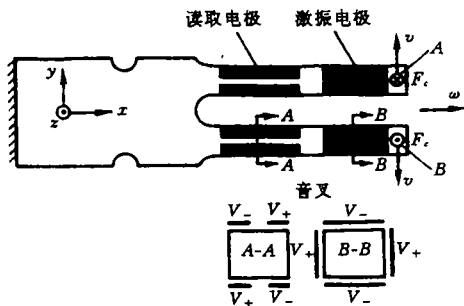


图1 单音叉振动式微机械陀螺仪

在激振电极上施加交变电压使音叉双臂以谐振频率振动,音叉双臂上各质点就沿 y 轴振动(因振幅很小,故可视为线振动)。设某质点的质量为 m ,振动规律为

$$s = s_0 \sin \omega_s t \quad (1)$$

当仪表壳体绕 x 轴以角速度 ω 相对惯性空间转动时,则作用在该质点上的哥氏惯性力为

$$F_c = 2m_s \omega s_0 \omega_s \cos \omega_s t \quad (2)$$

音叉双臂上各质点均受到交变的哥氏惯性力作用,使各质点产生沿 z 轴的振动。其振幅正比于输入角速度的大小,相位取决于输入角速度的方向。这一振动由读取电极检测,经解调后的输出信号可作为输入角速度的量度。

图2所示为美国斯佩里(Sperry)公司研制的双音叉振动式微机械陀螺仪^[3]。在这种方案中,有一呈“H”型的双端音叉,音叉的中部由支承与仪表壳体连接。

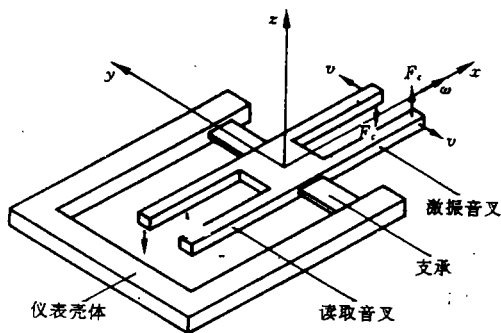


图2 双音叉振动式微机械陀螺仪

激振音叉双臂以谐振频率沿 y 轴振动,当仪表壳体绕 x 轴相对惯性空间转动时,由于各质点受到交变的哥氏惯性力作用,激振音叉双臂产生沿 z 轴的振动。这一振动传递到读取音叉,使其双臂产生同方向振动。与读取音叉连接的电极的输出信号,可作为输入角速

度的量度。

1.2 框架振动式微机械陀螺仪

图3所示为美国德雷珀(Draper)实验室研制的框架振动式微机械陀螺仪^[5]。在这种方案中,有2个框架,即内框架和外框架,并由挠性轴来支承;在内框架上固定一质量块,该质量块与内框架平面相垂直;在外框架两侧的仪表壳体上设置一对激振电极,在内框架两侧的仪表壳体上设置一对读取电极。

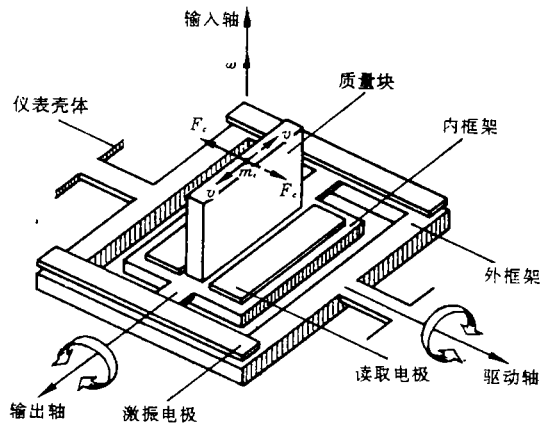


图3 框架振动式微机械陀螺仪

这里的框架和框架轴是在单晶硅上采用半导体加工工艺制作的。利用各向异性的化学蚀刻获得所需的几何形状,利用可选择的硼掺杂获得所需的物理特性(如框架轴的低扭转刚度)。质量块由光电抗蚀材料镀金而成。激振电极和读取电极是在玻璃板表面上溅射沉积一层金属而成。与各电极相对的硅制框架表面上也需进行金属化处理,以便起到极板的作用。

在2个激振电极上施加带直流偏置但相位相反的交变电压,由于交变的静电力所产生的绕驱动轴(外框架轴)的交变力矩的作用,使整个框架系统绕驱动轴做角振动。质量块上各质点则做线振动(因角振动振幅很小,故可视为线振动)。当仪表壳体绕输入轴相对惯性空间转动时,质量块上各质点将受到交变的哥氏惯性力作用,形成绕输出轴(内框架轴)交变的哥氏惯性力矩。在这一力矩作用下,内框架产生绕输出轴的角振动。其振幅正比于输入角速度的大小,相位取决于输入角速度的方向。这样,2个读取电极与内框架之间的间隙就按一定的简谐振动规律变化,亦即2对极板间的电容量均按一定的简谐振动规律变化。交变的电容信号经电子线路处理后,可获得正比于输入角速度的电压信号。

2 微机械加速度计

微机械加速度计又称硅加速度计,它感测加速度

的原理仍与一般的加速度计相同。根据读取元件的不同,微机械加速度计又有压阻式、电容式、静电力平衡式和石英振梁式之分。

2.1 压阻式和电容式微机械加速度计

压阻式微机械加速度计如图4所示^[6]。美国斯坦福(Stanford)大学研制的微机械加速度计采用此种方案。硅制检测质量由单挠性臂或双挠性臂支承,在挠性臂处采用离子注入法形成压敏电阻。当有加速度 a 输入时,检测质量受惯性力 F_a 作用产生偏转,并在挠性臂上产生应力,使压敏电阻的电阻值发生变化,从而提供一个正比于输入加速度的输出信号。

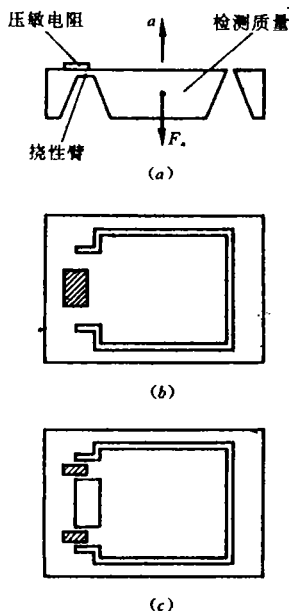


图4 压阻式微机械加速度计

电容式微机械加速度计则是在如图4所示的检测质量下面设置一读取电极。当加速度输入使检测质量偏转时,由读取电极与检测质量所构成电容器的电容发生变化,从而提供一个正比于输入加速度的输出信号。为了提高测量灵敏度,可采用差动电容式方案。

差动电容式微机械加速度计如图5所示^[7]。法国克鲁泽(Crouzet)公司研制的微机械加速度计采用此种方案。硅制检测质量由双挠性臂或四挠性臂支承,在检测质量两侧的仪表壳体上各设置1个电极。这些电极也是在玻璃板表面上溅射沉积一层金属而成。在硅制检测质量的表面上也需进行金属化处理,它与2个电极之间便形成具

有公共电极的2个电容器。当加速度输入使检测质量偏转(对双挠性臂支承方案)或平移(对四挠性臂支承方案)时,2个电容器的电容量发生差动变化,从而提供一个正比于输入加速度的输出信号。

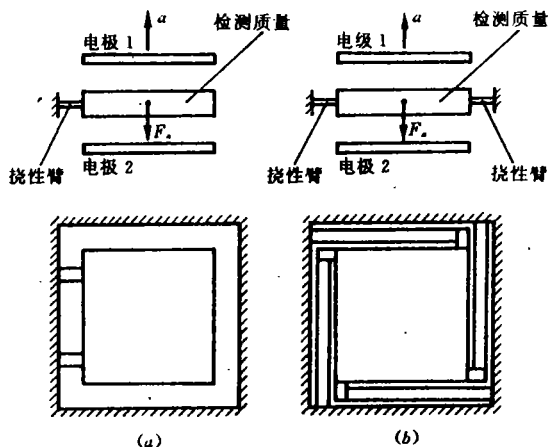


图5 差动电容式微机械加速度计

2.2 静电力平衡式微机械加速度计

上述压阻式或电容式微机械加速度计均是开环工作方式。当沿输入轴的加速度使检测质量产生偏转时,还将敏感沿交叉轴的加速度而引起交叉耦合误差,影响加速度计的测量精度。采用闭环工作方式可以克服这一不足。静电力平衡式微机械加速度计即属于此种类型。它利用力平衡回路产生的静电力(或力矩)来平衡加速度引起的作用在检测质量上的惯性力(或力矩)。施加在用以产生静电力(或力矩)的电极上的控制电压,可作为输入加速度的量度。

图6给出了静电力平衡式微机械加速度计的一种典型方案^[7,8]。美国诺斯罗普(Northrop)公司和法国克鲁泽公司研制的微机械加速度计采用此种方案。其基本结构与上述差动电容式的相同,但这里增设了1个静电力平衡回路。

当无加速度输入时,2个电容器极板的间隙相等,电容量相等。当有加速度 a 输入时,检测质量受惯性力

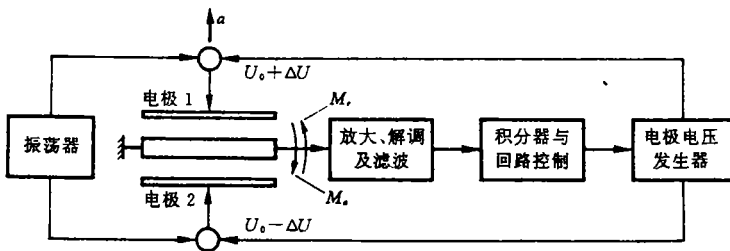


图6 静电力平衡式微机械加速度计的典型方案

作用,对挠性支承形成惯性力矩,其大小为

$$M_s = mla \quad (3)$$

其中 m 为质量, l 为质心到支承轴线的距离。惯性力矩使检测质量偏转,导致电容器 1 极板的间隙增大,电容 C_1 减小;而电容器 2 极板的间隙减小,电容 C_2 增大。电容差值 ΔC 作为控制信号,经电子线路形成控制电压 ΔU 。在电极 1 和电极 2 上均施加有偏置电压 U_0 。在控制电压 ΔU 作用下,使电极 1 上的电压增大,变为 $U_0 + \Delta U$,从而静电力增大;而电极 2 上的电压减小,变为 $U_0 - \Delta U$,从而静电力减小。这 2 个静电力所形成力矩的合力矩,即为静电力平衡回路所产生的静电力矩。

每个电极静电力的大小都与所施加的电场强度的平方成正比。由于静电力平衡回路具有足够高的增益,检测质量的偏角极小,即极板的间隙变化极小时,静电力矩便平衡了惯性力矩,故可近似认为每个电极静电力之矩均与所施加的电压的平方成正比。据此得到静电力矩的大小为

$$M_e = k(U_1^2 - U_2^2) \quad (4)$$

式中, k 为系数,它取决于介电常数、电极的几何形状及极板的初始间隙。将 $U_1 = U_0 + \Delta U$ 和 $U_2 = U_0 - \Delta U$ 代入上式,可得

$$M_e = 4kU_0\Delta U \quad (5)$$

静电力矩的方向恰与惯性力矩的方向相反,它具有恢复力矩的性质。当静电力平衡回路达到稳态时,有 $M_e = M_s$,于是得到

$$\Delta U = \frac{ml}{4kU_0}a \quad (6)$$

上式表明,如果把控制电压 ΔU 作为输出,则该输出电压与输入加速度 a 成正比。

图 7 给出了静电力平衡式微机械加速度计的另一典型结构^[9](静电力平衡回路在图中未示出)。

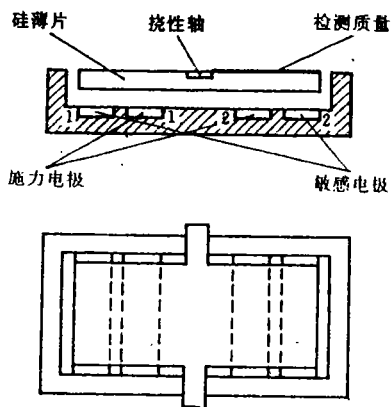


图 7 静电力平衡式微机械加速度计的另一典型结构

美国德雷珀实验室研制的微机械加速度计采用此种方案。在硅薄片一侧的一半表面上镀有一层金(镀金层起检测质量作用),并由一对挠性轴来支承。与上述方案的不同之处在于,这里的敏感电极和施力电极是各自独立设置的。这些电极均埋设在基片上,它们是借助于对硅的适当掺杂而实现的。硅薄片和埋入式电极都是掺入 P,基片掺入 N,使其形成电绝缘,而硅薄片本身则作为公共电极。至于这种方案的工作原理,仍然是与图 6 方案类似的。

2.3 石英振梁式微机械加速度计

在石英振梁式微机械加速度计中,利用石英振梁或称谐振器作为力的检测元件。石英振梁是在晶片上采用光刻工艺加工而成。长而薄的石英晶体以一定的频率振动,其谐振频率取决于它的几何形状和物理特性。如果晶体不受力时以某一谐振频率振动,则在受拉力作用时频率将增大,受压力作用时频率将减小。当有加速度输入时,加速度计中检测质量的惯性力将作用在谐振器上,使谐振频率上升或下降。

石英振梁式微机械加速度计可获得较高的测量精度。它有单振梁和双振梁 2 种结构形式。为了改善加速度计的偏值稳定性和信噪比,通常采用双振梁即双谐振器结构形式。

图 8 示出了石英振梁式微机械加速度计的一种典型方案^[3,10]。美国桑德斯特兰德(Sundstrand)数据控制公司研制的微机械加速度计采用这种双谐振器方案。2 个谐振器均为细而薄的石英振梁,其形状类似于双端音叉;它们被激励后将产生谐振,振动方向见图中示意。检测质量的一端由金属挠性接头与仪表壳体连接,另一端与谐振器连接,即谐振器对检测质量起到约束作用。

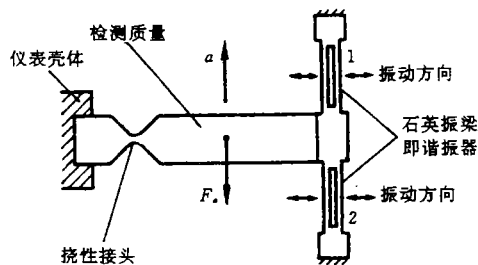


图 8 石英振梁式微机械加速度计的典型方案

假定无加速度输入时,2 个谐振器的谐振频率相等,均为 f_0 。当有加速度输入时,检测质量的惯性力使其中 1 个谐振器受拉力作用,并使另 1 个谐振器受压力作用。于是,前者的谐振频率上升,从 f_0 增至 f_1 ;后者的谐振频率下降,从 f_0 减至 f_2 。2 个谐振器的频率之差 $(f_1 - f_2)$ 与输入加速度 a 成正比。

从这种加速度计可以直接获得导航系统所需要的速度增量信息。速度增量的计算公式为^[10]

$$\Delta v = K(N_1 - N_2) \quad (7)$$

式中 K 是刻度系数; N_1 和 N_2 分别是 1 个采样周期 T 内 2 个谐振器输出累积的计数, 可表示为

$$N_1 = \int_{t_0}^{t_0+T} f_1 dt = f_1 T$$

$$N_2 = \int_{t_0}^{t_0+T} f_2 dt = f_2 T \quad (8)$$

因此速度增量公式可写成

$$\Delta v = KT(f_1 - f_2) \quad (9)$$

3 结束语

从以上对国外目前研制的几种微机械惯性仪表的综述中, 可以看出这种惯性仪表所要解决的一些关键技术问题。要使其进入工程实际应用, 还必须对它的理论、设计和工艺方法进行深入的探讨。

在惯性仪表中应用微电子技术, 是继应用激光技术之后又一引人注目的最新进展, 由此形成了一个全新的研究领域。这一发展趋势已经引起我国有关专家学者的高度重视。当然, 从目前情况看, 无论国外还是国内都在大力发展光学式惯性仪表。但与此同时, 开展微机械惯性仪表的研究工作, 以适应各种应用场合对惯性仪表多样化的需求, 并跟踪当前国外惯性技术的最新进展, 也是完全必要的。

本文工作得到中国航空工业总公司 618 所的大力支持, 628 所许国祯高级工程师在资料上提供了很多帮助, 在此一并致以谢意。

参考文献

- 1 许国祯. 微电子技术与惯性传感器. 中国惯性技术学会第二届学术年会论文, 1991.
- 2 Elwell J. Progress on Micromechanical Inertial Instruments. AIAA-91-2765-CP; 1482~1485.
- 3 Aronowitz Dr F, Hommons S D. Micromachined Quartz Sensor for Tactical Missions. Future Global Navigation and Guidance, Proceedings of the 49th Annual Meeting, 1993; 401~409.
- 4 Soderkvist J. Design of a Solid-state Gyroscopic Sensor Made of Quartz Sensors and Actuators. A21~A23, 1990; 293~296.
- 5 Boxenhorn B, Greiff P. A Vibratory Micromechanical Gyroscope. AIAA-88-4177-CP; 1033~1040.
- 6 Zanini M, Stevenson P. Silicon Microstructures; Merging Mechanics with Electronics. Ford Motor Co, 920472.
- 7 Lefort O. A Miniature, Low Cost, Silicon Micromachined Servo-Accelerometer. Symposium Gyro Technology 1988 Stuttgart, Germany, 1988. 9. 20/21.
- 8 Blanco J, Geen J. Micromachined Inertial Sensor Development at Northrop. Future Global Navigation and Guidance, Proceedings of the 49th Annual Meeting, 1993; 577~585.
- 9 Boxenhorn B, Greiff P. An Electrostatically Rebalanced Micromechanical Accelerometer. AIAA-89-3438-CP; 118~122.
- 10 高精度惯性器件译文集(加速度计). 中国航天工业总公司第3研究院33所, 1990.

(本文收稿日期: 1995-08)

读者服务卡编号 002□

征 稿 启 事

《测控技术》是由中国航空工业总公司主管、《测控技术》杂志社主办的中央级综合技术期刊, 曾分别于1988年和1994年首批入选“国家科技论文统计用期刊”和“中国科学技术期刊文摘(CSTA)数据库(英文版)”, 并被录入美国 ULRICH'S 国际期刊指南。

热诚欢迎国内外测控行业的专家、学者、工程技术人员、科研管理人员、市场营销人员就试验过程自动化和工业过程自动化有关的成果、经验等以论文形式投稿本刊。具体内容包括: 理论研究成果、具有特色的设计方案、工程经验、新产品介绍、技术发展趋势综述、市场分析等等。

为了增加信息量, 来稿篇幅以综述文章不超过6000字、其他文章不超过4000字、插图不超过5幅为宜, 字迹、图线、符号清晰, 并附有参考文献以及中、英

文题目、摘要、关键词(3~8个)等。为提高稿件处理速度, 欢迎用软盘(要求为文本文件)供稿, 并请提供原稿一份。

来稿还请提供第一作者简介, 包括: 年龄、性别、职务、职称、所在单位以及通讯地址、电话号码等, 并请自留底稿, 来稿原则上不退还。

自稿件发出之日起3个月内未收到录用或退稿通知的, 可来函来电查询。若本刊编辑部没有明确答复的, 作者可将该稿另投他刊。

来稿一律请寄: 北京 2351 信箱(100022)测控技术编辑部收。

* * * * *

为更好地为读者服务, 本刊拟开辟“读者信箱”栏目, 欢迎各界读者就自己所关心的、有关测控技术发展的重要问题或具体技术问题向该栏目投稿, 并请大家一起解答、共同探讨。

MEASUREMENT & CONTROL TECHNOLOGY

(bimonthly)

March 1996, Vol. 15, No. 2

MAIN CONTENTS

Suggestion on the Development of Chinese Aeronautic Sensors in the Next Decade	Liu Guangyu (3)
Summarization for Micromechanical Inertial Instruments	Guo Xuizhong, Chen Jiabin (6)
A Few Foreign Transducers for Measuring Aero-engine's Key Parameters	Zhou Xunwen (11)
Study of High Temperature Semiconductor Pressure Sensor	
.....	Mao Ganru, Yao Suying, Qu Hongwei, Zhang Weixin (16)
Interference Optical Fiber Acoustic Emission Sensor	
.....	Wang Guirong, Wang Xinghua, Wang Tingyun, Zhong Shengxuan (18)
Compound Compensation and Application of Silicon Pressure Resistor Sensor	Xie Sen, Mou Yubin (21)
Study on an Optical Powered Sensor with Optical Fiber Link	Liu ZhiYan, Wang Yutian, Teng Fengcheng (25)
Research of Apparatus (Series) for Medical Gas Volume Flow Rate	
.....	He Tiechun, Sun Yuxiang, Duan Junfua, Liu Gengmin, Lu Nan, Zhao Yan (28)
Digital Precision Bore Measuring System and Its Sensor	Li Jun (30)
Study on the Thermal Sensor with Fast Response for Robot	Li Qing, Su Zhong (32)
Development of a Kind of Non-contact Downhole Transmitter of Signals for Oil/Gas Well Testing	
.....	Ding Tianhuai, Wang Jingsong (34)
The Simulating HUD for Engineering Flight Simulator	Xia Yongjun (38)
An Easy Method to Improve the Range and Accuracy of Frequency Measurement for 8098 Microcontroller	
.....	Zhou Xingpeng (40)
Configuration of Field Programmable Gate Array	Jia Huibo, Wang Chongyang (42)
The Make-up Method and Application of Dual-port RAM in Multi-CPU System	Zhu Xinhua (44)
A Brief Account of Industrial Fieldbus LON	Huang Zhongfang, Jin Gang (50)
The Selected Latest Patents Index about Measurement and Control of Chinese Patents (19)	(57)

Competent Authority: Aviation Industries of China

Sponsor: Measurement & Control Technology Press

President: Wei Zongyang

Vice President: Jin Gang

Chief Editor: Zhou Ning

Advertisement Manager: Zhou Ruo

Add.: P. O. BOX 2351, Beijing, P. R. China

Post Code: 100022

Tel.: (8610) 502.6291-446

Fax.: (8610) 5005191

Publisher: Measurement & Control Technology Editorial Department

Printed by: San Yuan Printing House of Beijing Printing School

Domestic Main Distributor: Beijing Newspaper and Magazine Distribution Bureau

Subscription: All Post Offices Nationwide

Postal Code Name: 82-533

Oversea Main Distributor: China International Publications Trade Corporation
(P. O. Box 399, Beijing)

Oversea Postal Code Name: BM4122

Publication Number: ISSN 1000-8829
CN 11-1764/TB

Ads Business Licence: 0077 Issued by the Industrial and Commercial Bureau, Chao Yang District, Beijing

Oversea Price: US \$ 2.40