



(英) David H. Titterton John L. Weston

捷联惯性导航技术

(第2版)

Strapdown Inertial Navigation Technology
2nd Edition

张天光 王秀萍 王丽霞 等译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

责任编辑: 王晓光 bri_wang@163.com
余敬春
文字编辑: 贾 艳
责任校对: 钱辉玲
封面设计: 王晓军 xjwang@ndip.cn



捷联惯性导航技术 (第2版)

Strapdown Inertial Navigation Technology
2nd Edition

► 上架建议: 电子技术 ◀

<http://www.ndip.cn>

ISBN 978-7-118-05336-4



9 787118 053364 >

定价: 66.00 元

Strapdown Inertial Navigation Technology
(2nd Edition)

捷联惯性导航技术

(第2版)

(英) David H. Titterton John L. Weston

张天光 王秀萍 王丽霞 等译

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

捷联惯导技术是将陀螺和加速度计直接固连在载体上的一种惯性导航技术,广泛应用于军用飞机、导弹、潜艇、战车等。

本书重点介绍捷联惯导技术的基本原理、最新发展和在各种领域的具体应用,如捷联惯导系统的基本原理、陀螺技术、加速度计和多传感器技术、微型惯性传感器、测试、校准和补偿、设计举例,等等。本书的作者多年从事捷联惯导技术在航空工程里的应用工作,因此,书的内容非常新颖、实用,极具参考价值。

读者对象:高年级大学生、研究生和从事惯性技术工作的工程技术人员。

著作权合同登记 图字:军-2006-052号

图书在版编目(CIP)数据

捷联惯性导航技术 / 张天光等译. —2版. —北京:国防工业出版社,2007.12
ISBN 978-7-118-05336-4

I. 捷... II. 张... III. 捷联式惯性制导 IV. V448.131

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第128825号

Strapdown Inertial Navigation Technology (2nd Edition). David H. Titterton and John L. Weston. Original English Language Edition published by The IEE © 2004; The Institution of Electrical Engineers All Rights Reserved.

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本787×1092 1/16 印张24 $\frac{3}{4}$ 字数568千字
2007年12月第2版第1次印刷 印数1—3000册 定价66.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

捷联惯性导航技术

(第2版)

翻 译 张天光 王秀萍 王丽霞 宋振峰

曹旭东 刘怀勋 吴永刚 李德纯

李红民 吕长起 位晓峰

统 校 张天光

审 定 鲁 浩 樊会涛

译 序

捷联惯性导航技术是 1970 年以来伴随着军事需求和新型微电子技术的发展而兴起的一项先进技术。和传统的平台式惯性导航系统相比,捷联惯性导航系统具有体积小、质量小、成本低、可靠性高和易维护的特点,没有机械实体平台,被称为“数学平台”。

捷联惯性导航系统(SINS)具有很强的抗干扰能力,在今后的高科技战争中,无论是精确导航、定位和武器制导,还是在防区外实施精确打击,捷联惯性导航系统在各种制导武器中有着不可替代的特殊地位。

近十几年来,小型、低成本的捷联惯性导航系统和卫星导航全球定位系统(GPS)相结合,使精确打击发生了革命性的变化。

为了学习和借鉴国外,特别是美、欧在捷联惯性导航技术领域的先进理论和研究成果,我们引进并组织翻译了《捷联惯性导航技术》(第 2 版)这本最新版的权威专著。本书全面系统地描述了国外捷联惯性导航技术的最新发展成果,包括捷联惯导系统的总体设计与仿真、系统误差分析、捷联算法研究、传递对准技术研究、经典和现代惯性器件的介绍、惯性器件的建模与标定技术、SINS/GPS 组合导航理论以及军用和民用领域的各种应用,同时也给出了许多的工程应用实例,内容十分丰富,是一本特别适合工程技术人员学习与提高的专业参考书。

全书的翻译和审定由我院张天光研究员和首席惯导专家鲁浩研究员负责。前言、第 1 章、第 2 章、第 6 章和第 15 章由张天光翻译,第 3 章由位晓峰翻译,第 4 章和第 5 章由宋振峰翻译,第 7 章由李德纯翻译,第 8 章由刘怀勋翻译,第 9 章由王秀萍翻译,第 10 章由曹旭东翻译,第 11 章由吴永刚翻译,第 12 章由李红民翻译,第 13 章由王丽霞翻译,第 14 章由吕长起翻译。全书由张天光统校(其中吴永刚校对了第 1 章、第 2 章和第 6 章,王秀萍校对了第 15 章),最后由鲁浩和我院副院长兼总设计师樊会涛研究员审定。在本书的翻译过程中,我院的张拥军和孟俊芳等先生/女士在术语翻译的确定等方面提供了帮助,《航空兵器》编辑部的张巧淑在编辑和格式方面提供了帮助并审读了部分稿件,在此一并表示感谢。当然,我们还要特别感谢本书的作者 David H. Titterton 和 John L. Weston 先生,感谢他们为我们提供了一本有价值的专业参考书,同时也特别感谢出版商 The Institution of Electrical Engineers 允许我们翻译出版这本书。最后,我们希望本书的翻译出版对我们了解和掌握国外惯性技术的最新理论和设计方法具有重要的帮助作用,对我国惯性技术的发展和提高具有一定的推进作用。

中国空空导弹研究院院长 荣毅超

2007 年 5 月

原 序

由于一些技术取得了重要进展,近些年惯性传感器和惯性导航的应用获得了迅猛的发展。微机电传感器的快速发展和计算机的优异性能激发了很多新的应用领域。这些新的传感器和性能优异的计算机以及最新的计算方法应用于传统领域,使微型系统的性能不断提高。传统的应用领域包括:

- (1) 运动平台(运载体)的导航;
- (2) 用于飞机、导弹、舰船和地面车辆导引与控制系统的自动驾驶仪;
- (3) 陀螺框架和其他结构的控制。

过去5年,小型、廉价、性能可靠的传感器的出现促使人们对很多新奇的应用进行了探索。很多这样的新应用要么已经投入使用,要么正在开发。其中的例子包括:

- (1) 进行钻探作业时勘测地下管道;
- (2) 高性能运载体的主动控制;
- (3) 导弹滚转被动控制;
- (4) 标定与测量;
- (5) 个人交通。

最近已经出现了高精度传感器,如环形激光陀螺和冷原子传感器。这些器件继续得到开发,为测量运动和表观变异提供了一种独特的方法。结果,这些器件越来越多地用于各种新奇的领域,包括大地测量学和基础物理科学的研究。

尽管基于卫星的导航不是“捷联”技术,但像本书这样的教材,要想忽略卫星导航技术是不现实的。这种导航技术的不断进步已对导航方法和技术以及导航应用范围产生了深刻的影响。特别是,这种技术已与其他传感器一起使用而产生了非常有效、效费比高的导航技术,也就是众所周知的组合导航。在这种情况下,卫星导航将与其他应用一起考虑。另外,本书也对一些非惯性导航辅助器件进行了讨论。

本书的目的是对惯性导航的物理原理进行清晰、简明的描述,并详细讨论惯性传感器技术及其应用的最新发展。这包括最新的微机电器件和对角运动与线运动进行测量的新奇手段。

本书将对各种惯性导航技术提供最新的介绍,主要面向工程师和研究生。本书讨论一系列技术和评估方法,以便使读者对不同技术和器件的适用性做出有根据的判断。本书还提供了各种数据,以展示器件和系统所能达到的性能范围。

本书详细描述了评估不同技术的方法,包括测试、特征描述和标定方法。这些方法用于确保器件和系统实现最佳性能。本书还给出了不少实例,用于突显不同方法之间的相互作用以及它们对性能的影响。

这些方法和技术应用在一个详细的设计实例中,以展示确定和分析问题、推导合适

的技术指标、设计具体方案等方法。设计实例还考虑了计算需求、接口和评估方法。该实例对那些想使一个系统满足某项技术指标的技术人员特别有用,因为它展示了设计过程中潜在的相互影响和指标与性能之间必须做出的协调和让步。

本书第二版增加了一章描述惯性敏感器和惯性技术的现代不寻常应用的内容,目的是激发工程师和技术专家利用大量已有的技术、方法和工艺手段进行更广泛的创新。本章还包括一个简明的设计实例,用以展示系统在恶劣环境中使用的问题。

捷联惯性导航技术使用很多专业术语、行业术语和表达式。本书附录对这些术语进行了解释或定义,以帮助对这项技术的理解。此外,本书还包括了与捷联惯性导航技术有关的概念与技术的一些附录。

要完成这么大的一项工程,没有很多人的帮助是不可能的,对此我们深表谢意。我们特别要对下列人员提供的帮助和鼓励表示感谢:

QinetiQ 公司的 S. K. 戴维森(Davison)先生、P. 格罗夫斯(Groves)博士和 K. 布伦森(Brunsen)博士;

BAE 系统公司的 E. 惠特利(Whitley)先生、R. 方丹(Fountain)博士和 P. G. 穆尔(Moore)先生;

DSTL 的 J. I. R. 欧文(Owen)和 P. 马兰(Marland)先生;

BEI 技术公司 Systron - Donner 惯性分部的 G. 贝克(Baker)先生;

RAE Farnborough 原职员 C. R. 米尔恩(Milne)先生;

Ferranti 原职员、后来是 GEC 航空电子公司职员的 A. D. 金(King)先生;

Charles Stark Draper 实验室公司的 W. D. Coskren 先生;

英国 SULA 系统公司的 G. 维格斯(Vigurs)先生;

Halliburton 能源服务集团 Sperry - Sun 公司的 P. 罗德尼(Rodney)博士和 D. P. 麦克罗比(McRobbie)先生;

瑞典皇家技术学院的 Milan Horemuz 博士;

德国 FGAN - FOM 的 R. Ebert 和 P. 卢茨曼(Lutzmann)博士;

新西兰坎特伯雷大学的 G. E. 斯特德曼(Stedman)教授;

德国慕尼黑技术大学巴伐利亚 Fundamentalstation Wetzell 的 E. U. 施赖伯(Schreiber)教授;

美国印第安纳州 Crane 镇 NSWG 的 B. 瓦戈纳(Waggoner)先生;

德国 SEG 的 D. 戈策(Goetze)先生。

目 录

第1章 引言	1
1.1 导航	1
1.2 惯性导航	2
1.3 捷联技术	2
1.4 本书的编排	3
参考文献	4
第2章 惯性导航的基本原理与发展历程	5
2.1 基本概念	5
2.2 小结	7
2.3 发展历程	8
2.4 当代惯性导航系统	10
2.5 惯性传感器的发展趋势	10
参考文献	11
第3章 捷联惯性导航系统的基本原理	12
3.1 概述	12
3.2 简单的二维捷联导航系统	12
3.3 参考坐标系	14
3.4 三维捷联导航系统的基本分析	15
3.5 捷联系统的机械编排	18
3.6 捷联姿态表达式	24
3.7 详细导航方程	33
参考文献	39
第4章 陀螺技术1	41
4.1 概述	41
4.2 常规传感器	42
4.3 速率传感器	59
4.4 振动陀螺	62

4.5 低温器件	70
4.6 静电悬浮陀螺	73
4.7 其他的角运动敏感器件	74
参考文献	78
第5章 陀螺技术2	80
5.1 光学敏感器	80
5.2 冷原子敏感器	99
5.3 陀螺技术小结	102
参考文献	104
第6章 加速度计和多功能敏感器技术	106
6.1 概述	106
6.2 平移运动的测量	106
6.3 机械敏感器	107
6.4 固态加速度计	112
6.5 多功能敏感器	119
6.6 角加速度计	125
6.7 倾斜仪	127
6.8 加速度计和多功能敏感器技术小结	127
参考文献	128
第7章 微型惯性敏感器	129
7.1 概述	129
7.2 硅加工	131
7.3 微型陀螺技术	131
7.4 微型加速度计技术	139
7.5 微型光机电系统	144
7.6 多轴/旋转构件	144
7.7 基于微机电系统的惯性测量装置	144
7.8 系统集成	146
7.9 小结	146
参考文献	147
第8章 测试、标定和补偿	148
8.1 概述	148
8.2 试验原理	148
8.3 试验设备	150

8.4	数据记录设备	150
8.5	陀螺仪试验	151
8.6	加速度计试验	164
8.7	标定与误差补偿	171
8.8	惯性导航系统的测试	173
8.9	半实物仿真测试	175
	参考文献	176
第9章	捷联系统技术	178
9.1	概述	178
9.2	捷联导航系统的组成	178
9.3	仪表组件	179
9.4	仪表的电子部件	183
9.5	姿态计算机	184
9.6	导航计算机	185
9.7	电源调整	186
9.8	减振基座	186
9.9	小结	187
	参考文献	188
第10章	惯性导航系统的对准	189
10.1	概述	189
10.2	基本原理	189
10.3	地面对准	193
10.4	空中对准	198
10.5	海上的对准	206
	参考文献	211
第11章	捷联导航系统计算	212
11.1	概述	212
11.2	姿态计算	212
11.3	加速度矢量变换算法	223
11.4	导航算法	226
11.5	小结	228
	参考文献	229
第12章	广义系统性能分析	231
12.1	概述	231

12.2	二维捷联惯性导航系统误差传播	231
12.3	广义误差方程	236
12.4	分析评估	242
12.5	通过仿真手段进行评估	251
12.6	捷联系统性能的运动相关性	255
12.7	小结	261
	参考文献	261
第 13 章	组合导航系统	263
13.1	概述	263
13.2	基本原理	263
13.3	外部辅助导航设备	264
13.4	机载测量	275
13.5	系统综合	280
13.6	卡尔曼滤波在辅助惯性导航系统中的应用	281
13.7	INS-GPS 组合	287
13.8	多传感器组合导航	293
13.9	小结	294
	参考文献	294
第 14 章	设计举例	296
14.1	概述	296
14.2	需求背景	296
14.3	导航系统要求	297
14.4	选择捷联惯导的原因	299
14.5	导航系统设计和分析过程	300
14.6	试验、标定和补偿要求	308
14.7	用辅助方式提高性能	309
14.8	小结	309
	参考文献	309
第 15 章	惯性敏感器和惯性系统的其他应用	310
15.1	概述	310
15.2	井孔勘探	310
15.3	船舶惯性导航系统(SINS)	318
15.4	运载体的稳定与控制	320
15.5	设备稳定	330
15.6	大地与地球物理测量和基本物理现象的观测	347

15.7 其他应用	350
15.8 小结	355
参考文献	356
附录 A 卡尔曼滤波	358
附录 B 惯性导航系统的误差预估.....	364
附录 C 惯性系统结构形式.....	367
附录 D GPS 与 GLONASS 卫星导航系统的比较	370
符号表	374
术语简介	377

第1章 引言

1.1 导航

导航是一种古老的技艺,现在它正变成一门复杂的科学。它基本上是关于两地之间旅行和找路的学问;这可以用不同的手段来实现^[1]。

也许导航最简单的方式之一是按照指路说明行事。例如,一个人想从所在的地方到另一个给定的地方,别人可能这样告诉他:在下一个路口向右拐,在“玫瑰和皇冠”向左拐,沿着一个给定路标的右侧走……前面就是。显然,这种导航方法依赖对我们周围环境中已知特征或固定物体的观察和识别,并在它们之间运动。在技术描述中,这些特征物的位置常常被称为“航路点”。

这一过程的延伸是按照地图的导航。在这种情况下,导航员通过观察地图上的地理特征(如道路、河流、山丘和山谷)来确定自己的位置。这些特征可依照网格系统(即坐标系)标志在地图上。例如,地物特征的位置常常由相对于地球赤道和格林尼治子午线的纬度和经度表示。因此,导航员就能确定自己在该坐标系中的位置。随后读者就会清楚,坐标系的使用对导航过程来说是最基本的。

作为另一种方法,导航员也可以通过选择其他物体或自然现象来确定自己的位置。一个广泛使用的古老方法是观测自己相对于固定天体的位置。固定天体有效地确定了一个在空间固定的坐标系。这样的坐标系通常称为“惯性”坐标系,而天体观测可使观测者确定自己相对于该坐标系的位置。在考虑了地球的运动和观测时间之后,导航员就可以利用天体测量来确定自己在地球表面的位置。这种依靠对外部世界的观察来进行导航的系统称为“位置固定”系统。

海上精确导航主要的困难之一,是缺少一个精确的时间坐标来确定经度。只要能看到,纬度可以通过天体确定。但另一坐标取决于观测的时刻。在18世纪,英国皇家天体学家组织了一系列研究来解决“经度问题”。该问题最终被约翰·哈里森(John Harrison)解决。他是林肯郡一位没有受过正规教育的木匠。他发明了一种能在船上精确地计量时间的记时计^[2]。

另一种方法是使用“推算法”原理——根据初始位置和速度与方位的测量来计算当前位置。推算过程通过记录最后一次已知位置和获取该位置的时间、随后的平均速度和航向以及当前时间来完成。速度需要通过航向角分解为向北和向东的速度分量。然后每一分量与从上一位置开始经历的时间相乘,获得位置变化。最后,位置变化量与初始位置相加而获得当前位置。

这一过程也可以利用惯性敏感器(陀螺仪和加速度计)测量相对于惯性坐标系的转动和平移运动来完成。这就是所说的惯性导航。

1.2 惯性导航

惯性导航系统建立在牛顿经典力学定律的基础之上。牛顿定律指出,除非受到作用在物体上的外力的干扰,否则,运动的物体将一直进行匀速直线运动。该定律还告诉我们,外力将对物体产生一个成比例的加速度。由于加速度可以测定,所以,通过用加速度对时间进行连续积分就可以计算出速度和位置的变化。加速度可通过一种叫做加速度计的器件来确定。一个惯性导航系统通常包含 3 个这样的器件,每一个可以检测单一方向的加速度。加速度计的安装通常是让它们的敏感轴相互垂直。

为了在惯性坐标系实施导航,我们需要跟踪加速度计所指的方向。物体相对于惯性坐标系的转动可以利用陀螺传感器来检测;物体的转动用于确定加速度计在每一时刻的方位。有了这些信息,就可以把加速度分解到惯性坐标系,然后开始积分过程。

因此,惯性导航就是用陀螺仪和加速度计提供的测量数据确定所在运载体的位置的过程。通过这两种测量的组合,就可以确定该运载体在惯性坐标系里的平移运动并计算它的位置。

与其他类型的导航系统不同,惯性系统在运载体内是完全自成一体的,也就是说,它不需要从运载体传送信号或者从外部接收信号。但是,惯性导航系统需要精确获取运载体的初始位置。这样,惯性测量值就用于估算运载体随后的位置变化。

1.3 捷联技术

尽管所有类型的惯性导航系统的基本原理都是一样的,但它们的实施却有各种不同的形式。惯性导航技术的原始应用都采用稳定平台技术^①。在这样的系统里,惯性敏感器安装在一个稳定平台上,并与运载体的转动进行隔离。平台系统现在仍然很常用,特别是在需要精确估算导航参数的场合(如船舶和潜艇)。

现代系统通过把敏感器固连(或固定)在运载体的壳体上而去除了平台系统大部分的机械复杂性。和等效的平台系统相比,这种方法的潜在好处是成本降低、尺寸减小、可靠性提高。结果,小型、精确的惯性导航系统现在可以装到小型导弹上,所带来的主要问题是计算复杂性显著增加,而且需要能测量高转速的器件。然而,计算机技术的不断进步与适用敏感器的开发相结合,使这种设计成为现实。

这种惯性导航系统通常称为“捷联”惯性导航系统,是本书讨论的主题。尽管讨论老式的、比较成熟的平台技术的书籍有很多,但清晰地描述捷联系统的书籍还没有。这是出版本书的主要动因。

本书描述惯性导航的基本概念和引发现代捷联系统出现的技术发展。本书给出捷联惯性导航这一主题的概述,面向惯性敏感器和系统的各级供应商以及这些产品的用户,目的是促使他们建立更有效的双向对话。

^① 主要进展发生在 1953 年,飞行验证了全惯性导航的可行性;验证的系统称为 SPIRE(空间惯性参考设备),直径 5 英尺,质量 2700 磅。1 英尺(ft)=0.3048m,1 磅=0.454kg。

通过有选择的阅读,刚进入这一领域的工程师们可以对该主题有一个基本的了解。对那些需要密切参与捷联系统技术各方面工作的人来说,本书对系统结构给出了更全面的描述,对捷联惯性敏感器和计算需求进行了评价,对用于系统分析和评估的各种技术进行了深入的讨论。本书给出了参考文献,供那些想进一步了解该领域不同侧面的读者参考。

捷联惯性导航系统建立在复杂的技术之上。很多技术术语和行业术语变得很常用。本书附录的术语简介给出了这些术语的定义。

一般情况下,我们给出所涉及物理原理和过程的数学描述。那些刚接触本领域的读者,如果只想了解所涉及过程的物理原理,而对其数学细节不感兴趣,可只记下数学推导的结果,或者干脆跳过这部分内容。

1.4 本书的编排

第2章介绍捷联惯性导航系统的基本概念和简化的实例,然后给出系统必须具备的基本功能的定义。本章将表明,转动与平移运动的测量对一个惯性导航系统来说是最根本的问题。接下来对捷联惯性导航系统的发展历程进行了简要回顾,并对系统应用进行了概括。

第3章更详细地讨论了把转动测量与平移运动测量结合起来形成一个惯性导航系统的方法。本章还用一定的篇幅讨论姿态计算和导航方程的概念,两者对捷联惯性导航系统的工作都是最基本的。另外,本章还描述了几种可能的系统结构。

第4章至第7章较详细地讨论了陀螺技术和加速度计技术。这部分内容描述了正在使用的各种器件以及在不久的将来很可能使用的器件。这包括常规的角动量陀螺、光学速率敏感器(如环形激光陀螺和光纤陀螺)、摆式力反馈加速度计、固体器件、冷原子敏感器以及多功能敏感器。本章包括器件的机械与电子性能、测量精度、数学描述和各种应用。第7章专门描述微型加工机电系统(MEMS)敏感器技术及其性能。该技术最近几年在现代导航与稳定系统中的应用越来越广泛。

第8章讨论惯性敏感器与系统的测试、标定和补偿。可以通过算法实施对可预测的误差(来自对系统性能的观测)进行纠正或补偿;这些算法最大限度地接近经典敏感器误差模型的相反过程。

第9章描述捷联惯性系统的基本构件和各种机械编排。

实现精确导航的一个关键因素是导航开始前惯性导航系统的初始化;对飞机导航系统来说,就是起飞前的初始化。这一过程涉及精确确定运载体导航系统相对于所选坐标系的位置、速度和姿态,通常称为惯性导航系统对准。这种对准可能需要在运动的运载体上进行,如机载惯性导航系统的飞行中对准。

第10章重点讨论了在各种运载体上实现精确对准的困难以及解决这些问题的方法。

第11章讨论陀螺与加速度计测量数据的计算机处理。要想完成导航任务,这些处理是必须完成的。本章还较为详细地讨论了各种算法。

为了让设计者评估系统性能,第12章讨论了惯性导航系统性能分析方法。本章主

要讨论了对捷联系统特别重要的一些误差,并重点讨论了用于评估系统性能的仿真方法。

在很多应用中,通常的做法是把惯性导航系统的输出与某些外部测量数据结合起来,实现导航精度的总体改善。例如,独立位置坐标可用于辅助惯性导航系统,使导航精度超过单独使用定位系统或惯性导航系统所能达到的性能。第13章讨论可用的导航辅助设备以及把惯性和外部测量数据结合起来形成所谓的组合惯性导航系统的各种方法。

第14章通过讨论一个设计实例来把前面几章内容结合在一起。由于作者的工作背景主要在导弹系统领域,所以,本章的实例也在这一领域。对那些想设计一个满足给定需求的系统,而且还要评估其潜在性能的工程师来说,该设计实例将非常有用。

最后,第15章描述了惯性导航系统的一系列应用,包括海上、空中、地面与地下的军事与民用系统。本章主要讨论在把惯性导航技术应用到更广的领域后,设计各种导航与稳定系统时遇到的具体问题。

本书的附录介绍了卡尔曼滤波、惯性导航误差分配、惯性系统结构以及GPS与GLO-NASS卫星导航系统的比较。本书的最后列出了用到的主要术语。

参考文献

- 1 ANDERSON, E. W. : 'The principles of navigation' (Hollis and Carter, 1966)
- 2 SOBEL, D. : 'Longitude: the true story of a lone genius who solved the greatest scientific problem of his time' (Penguin Books, 1996)