



航空仪表与显示系统

HANGKONG YIBIAO YU XIANSHI XITONG

◎主编 林 坤 ◎主审 白冰如

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

航空仪表与显示系统

林 坤 主编

白冰如 主审



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书主要介绍现代航空仪表的原理、功用、组成、使用方法及警告与显示系统的相关显示格式和作用等内容。全书共分8章,分别为:航空仪表概论、航空仪表基础、大气数据仪表、全/静压系统、陀螺仪表、发动机仪表、航空仪表警告与显示系统、航空仪表的其他相关系统。本书内容基本涵盖了目前广泛使用的机载仪表的内容。由于本书力求内容精练、概念清晰,每章均选了一定量难易适中的习题,便于学生自学和教师施教。本书可供航空维修相关专业的学生和工程技术人员参考,同时对于广大航空爱好者来说,本书也是一本具有特点的科普读物。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

航空仪表与显示系统/林坤主编. —北京:北京理工大学出版社, 2015. 2

ISBN 978-7-5682-0187-2

I. ①航… II. ①林… III. ①航空仪表-显示系统 IV. ①V241

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第008909号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775 (总编室)

82562903 (教材售后服务热线)

68948351 (其他图书服务热线)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/三河市华骏印务包装有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/14

字 数/318

版 次/2015年2月第1版 2015年2月第1次印刷

定 价/44.00元

责任编辑/封 雪

文案编辑/张鑫星

责任校对/周瑞红

责任印制/马振武

图书出现印装质量问题,本社负责调换



前 言

本书是根据航空电子设备维修专业培养目标及全面培养高技能型人才的要求编写。为了便于学习使用,将原有“航空仪表”和“传感器检测技术及应用”两门课程内容合二为一,并对原教材进行了全面改编和更新,在此基础上编写了《航空仪表与显示系统》。

在编写过程中,编者认真汲取了各种相关教材编写经验,广泛涉猎了航空仪表的相关文献,充分结合教学实践经验和教学过程中积累及反馈的信息。本书紧密联系航空仪表的实际应用和发展趋势,着重介绍了航空仪表的基本理论、使用方法、特点、注意事项及维护实例等内容,并在原有内容基础上增加了航空仪表的警告与显示系统及大气数据计算机系统和飞行数据记录系统等新内容。本书内容充实、图文并茂、覆盖面广,同时力求通俗易懂,注重对基本概念与理论的叙述,简化公式推导,加重使用和维修的介绍,旨在使读者通过对本书的学习,充分了解航空仪表的实际情况与发展动态,为从事航空维修相关工作打下良好的理论基础。

全书共8章,第1章航空仪表概论,概述了航空仪表的发展历程、布局、显示格式、分类等;第2章航空仪表基础,介绍了航空仪表中使用的电容、电感等传感器的基本功能和工作原理;第3章大气数据仪表,讲述了高度表、空速表、马赫数表和升降速度表的功能、原理、使用特点和维修等;第4章全/静压系统,讲述了全/静压系统的结构、组成、常见故障和使用注意事项等;第5章陀螺仪表,详细阐述了陀螺原理、转弯侧滑仪、航空地平仪、姿态指引仪、磁罗盘、陀螺半罗盘和陀螺磁罗盘等仪表;第6章发动机仪表,包括压力表、推力表、温度表、转速表、油量表、振动表、流量计的内容;第7章航空仪表警告与显示系统,全面讲述了目前民航飞机上广泛使用的航空仪表警告系统、EFIS系统和EICAS系统的相关内容;第8章航空仪表的其他相关系统,讲述了大气数据计算机系统和飞行数据记录系统等内容。

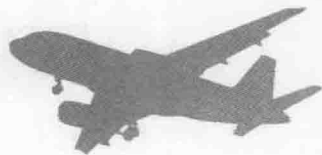
本书由林坤任主编,参加编写的人员有林坤(第2章、第5章、第7章)、冯喆(第3章、第4章)、石日昕(第1章)、王林林(第6.1~6.3节)、尚琳(第6.4~6.7节)、谭卫娟(第8章)。

本书由白冰如担任主审,主审提出了许多宝贵的建议;本书在编写和出版过程中得到了北京理工大学出版社的大力支持和帮助;另外,在编写中还广泛参考了同类教材和书籍,借鉴了其他同行的研究成果,在此一并表示衷心的感谢。

由于资料 and 水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正,以便不断补充和完善。

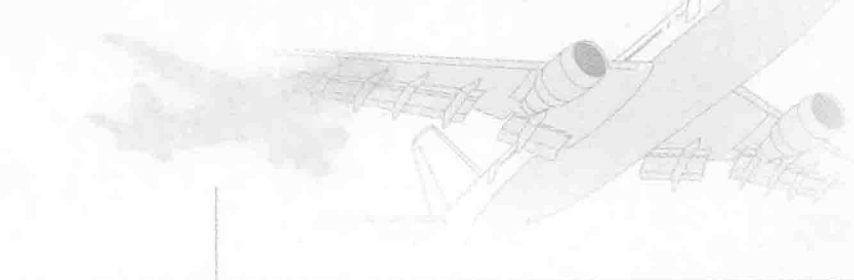
编 者

第1章 航空仪表概论	1
1.1 航空仪表的发展历程	1
1.2 航空仪表的布局与数据显示格式	3
1.2.1 航空仪表的布局	3
1.2.2 航空仪表的数据显示格式	5
1.3 航空仪表的分类	6
1.4 模拟式/数字式电子仪表的优缺点	7
思考与练习	7
第2章 航空仪表基础	9
2.1 传感器的基本概念	9
2.1.1 传感器的定义与组成	9
2.1.2 传感器的分类	10
2.1.3 传感器的基本特性	10
2.1.4 传感器的测量误差	14
2.2 电阻式传感器	16
2.2.1 电阻式传感器的工作原理	16
2.2.2 电阻应变式传感器	17
2.3 电容式传感器	19
2.3.1 变间隙式电容传感器	19
2.3.2 变面积式电容传感器	21
2.3.3 变介电常数式电容传感器	21
2.4 电感式传感器	22
2.4.1 变间隙式电感传感器	22
2.4.2 变面积式电感传感器	23
2.4.3 螺管式电感传感器	23
2.5 压电式传感器	24
2.5.1 压电效应	24
2.5.2 压电式传感器的测量电路	26
2.6 热敏传感器	26
2.6.1 热电偶式传感器	27



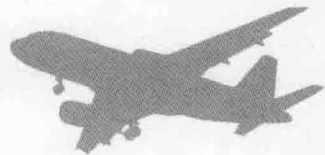
目 录 >>>

2.6.2	热电阻式传感器	31
	思考与练习	32
	第3章 大气数据仪表	33
3.1	气压式高度表	33
3.1.1	飞行高度及测量方法	33
3.1.2	高度表的原理	35
3.1.3	高度表的结构	36
3.1.4	高度表的使用	39
3.1.5	高度表的误差	41
3.1.6	气压式高度表的维护实例	42
3.2	空速表	43
3.2.1	气流的动压和静压	44
3.2.2	测量空速的原理	44
3.2.3	空速表的结构	46
3.2.4	空速表的误差	48
3.2.5	空速表的维护实例	49
3.3	马赫数表	50
3.3.1	马赫数表的功用	50
3.3.2	测量马赫数的原理	50
3.3.3	马赫—空速表的指示	51
3.4	升降速度表	52
3.4.1	升降速度表的原理	52
3.4.2	升降速度表的结构	53
3.4.3	升降速度表的误差	53
3.4.4	升降速度表的维护实例	54
	思考与练习	55
	第4章 全/静压系统	56
4.1	静压系统	56
4.2	全压系统	57
4.3	全/静压系统	58



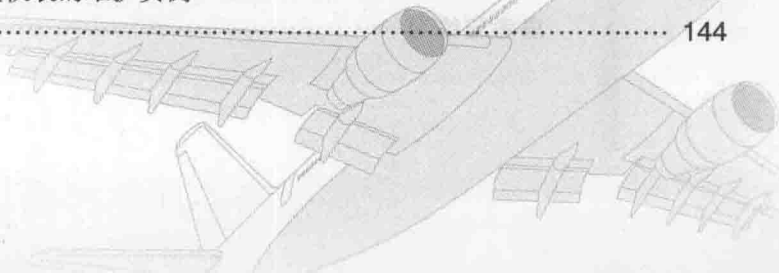
《《《 目 录

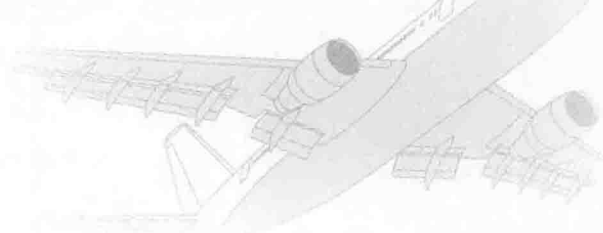
4.4	系统结构	59
4.5	全/静压系统常见故障分析	61
4.5.1	管路泄漏对仪表显示的影响	61
4.5.2	管路堵塞对仪表显示的影响	62
4.6	全/静压系统使用注意事项	63
4.6.1	飞行前检查	63
4.6.2	空中使用	64
4.7	全/静压系统的维护实例	64
4.7.1	全/静压系统	64
4.7.2	全/静压系统的故障分析	65
4.7.3	全/静压系统的维护实施	65
	思考与练习	67
	第5章 陀螺仪表	68
5.1	陀螺的基本知识	68
5.1.1	陀螺的种类	69
5.1.2	陀螺的基本特性	70
5.2	陀螺仪表的应用	74
5.3	姿态仪表	74
5.3.1	转弯侧滑仪	74
5.3.2	航空地平仪	81
5.3.3	姿态指引仪	90
5.3.4	姿态仪表的维护实例	91
5.4	航向仪表	95
5.4.1	航向及航线	95
5.4.2	磁罗盘	97
5.4.3	陀螺半罗盘	103
5.4.4	陀螺磁罗盘	107
5.4.5	航向仪表的维护实例	109
	思考与练习	110



目 录 >>>

第6章 发动机仪表	112
6.1 测量压力的仪表	113
6.1.1 进气压力表	113
6.1.2 电动压力表	114
6.1.3 压力仪表的维护实例	117
6.2 测量推力的仪表	121
6.2.1 发动机压力比与推力的关系	121
6.2.2 压力比表	121
6.3 测量温度的仪表	122
6.3.1 热电阻式温度表	123
6.3.2 热电偶式温度表	123
6.3.3 温度仪表的维护实例	124
6.4 测量转速的仪表	128
6.4.1 磁转速表	128
6.4.2 磁电式转速表	129
6.4.3 转速仪表的维护实例	130
6.5 测量油量的仪表	133
6.5.1 浮子式油量表	133
6.5.2 电容式油量表	134
6.5.3 油量仪表的维护实例	135
6.6 测量振动的仪表	138
6.6.1 速度式测振传感器	138
6.6.2 加速度式测振传感器	138
6.6.3 振动的指示	139
6.7 测量流量的仪表	140
6.7.1 叶轮式流量计	140
6.7.2 角动量式流量计	141
6.7.3 流量仪表的维护实例	142
思考与练习	144





《《《 目 录

第7章 航空仪表警告与显示系统	145
7.1 航空仪表警告系统	145
7.1.1 警告系统的组成及功能	145
7.1.2 高度警告	146
7.1.3 超速警告	149
7.1.4 失速警告	151
7.2 电子飞行仪表系统	155
7.2.1 EFIS 的组成及功能	157
7.2.2 EFIS 显示格式	161
7.2.3 EFIS 的主要工作情况	166
7.2.4 EFIS 的维护实施	167
7.3 发动机指示和机组警告系统与电子中央飞机监控系统	169
7.3.1 EICAS 的组成	170
7.3.2 EICAS 的显示	174
7.3.3 EICAS 系统的异常显示	182
7.3.4 电子中央飞机监控系统 (ECAM)	182
思考与练习	192
第8章 航空仪表的其他相关系统	193
8.1 大气数据计算机系统	193
8.1.1 模拟式大气数据计算机系统	194
8.1.2 数字式大气数据计算机系统	194
8.2 飞行数据记录系统	203
8.2.1 概述	203
8.2.2 数字式飞行数据记录系统	204
思考与练习	209
参考文献	210



第1章 航空仪表概论

航空仪表是飞机上全部仪表的总称。在飞机的驾驶舱中可以看到许多仪表。航空仪表的种类较多，分别用来测量（或计算）飞机在运动状态中的各种飞行参数，以及飞机发动机和其他一些设备的工作参数。随着航空事业的飞速发展，飞机的飞行速度、飞行高度和气象标准的提高，飞机自动化程度越来越高。现在的航空仪表除了为飞行员提供驾驶飞机用的目视显示数据外，还要为各种导航系统、自动飞行控制系统和飞行数据记录器等机载设备提供各种输入数据。



1.1 航空仪表的发展历程

航空仪表的发展与科学技术和飞机的发展是分不开的。在飞机刚问世时，因其本身结构简单，飞行高度和速度都很低，飞机上没有航空仪表。后来，随着飞行时间和飞行距离的增加，才开始安装时钟、航速计和指南针等简陋的仪表设备。驾驶员只能在晴朗的白天，依靠地图和地标来飞行。第一次世界大战期间，迫于军事上的需要，一些国家大力投资发展航空事业，飞机上开始安装空速表、高度表、磁罗盘、发动机转速表和滑油压力表等航空仪表。到了20世纪30年代，为使飞机能在云中或夜间飞行，又增添了升降速度表、转弯侧滑仪、陀螺地平仪和陀螺方向仪等航空仪表。总之，随着科学技术的发展，航空仪表的发展是紧跟飞机发展而发展的。

从航空仪表在各个历史时期出现的不同结构与形式来看，它的发展过程大体分为以下5个阶段。

1. 机械仪表阶段

这个阶段是仪表的初创时期，多数仪表为单个整体直读式结构，也称为直读式仪表，即



传感器和指示器组装在一起的单一参数测量仪表，其表内敏感元件、信号传送和指示部分均为机械结构，例如早期的空速表和高度表。

机械仪表的最大优点是结构简单、工作可靠、成本低廉；它的缺点是灵敏度较低，指示误差较大。随着飞机性能和要求精度的不断提高，机械仪表早已不能满足航空发展的需要。

2. 电气仪表阶段

从 20 世纪 30 年代起，航空仪表已由机械化逐步走向电气化，发展成电气仪表，此时的仪表称为远读式仪表，如远读式磁罗盘、远读式地平仪等。所谓“远读”是指仪表的传感器和指示器没有装在同一个表壳内，它们之间的控制关系是通过电信号的传递实现的，因相距较远，故称为远读式仪表。

用电气传输代替机械传动，可以提高仪表的反应速度、准确度和缩短传输距离。将仪表的指示部分与其他部分分开，使仪表板上的仪表体积大为缩小，改变了因仪表数量多而出现的仪表板拥挤状况。另外，仪表的敏感元件远离驾驶舱，减少了干扰，提高了敏感元件的测量精度。远读式仪表也存在一些缺点，如整套仪表结构复杂、部件增多、重量增加。

3. 机电式伺服仪表阶段

为了进一步提高仪表的灵敏度和精度，20 世纪 40 年代后期，出现了能够自动调节的小功率伺服系统仪表，即机电式伺服仪表。伺服系统又称为随动系统，它是一种利用反馈原理来保证输出量与输入量相一致的信号传递装置；对仪表信号采用伺服系统方式来传送，信号能量得到放大，提高了仪表的指示精度和带负载能力，可以实现一个传感器带动几个指示器，有利于仪表的综合化和自动化。

4. 综合仪表阶段

20 世纪 50 年代后期，由于飞机性能迅速提高，各种系统设备日益增多，所需指示和监控仪表大量增加，有的飞机上已多达上百种，仪表板和座舱无法安排，驾驶员也目不暇接、眼花缭乱；另外，飞机的飞行速度和机动性能的提高，又使驾驶员观察仪表的时间相对缩短，容易出错，因此把功能相同或相关的仪表指示器有机地组合在一起，形成统一指示的综合仪表，已成为航空仪表发展的必然趋势。例如，综合罗盘指示器、组合地平仪和各种发动机仪表的相互组合等都是一表多用的结构形式。

机电式综合仪表一直使用到 20 世纪 60 年代末。如图 1.1-1 所示为典型机电式综合仪表及其布局。

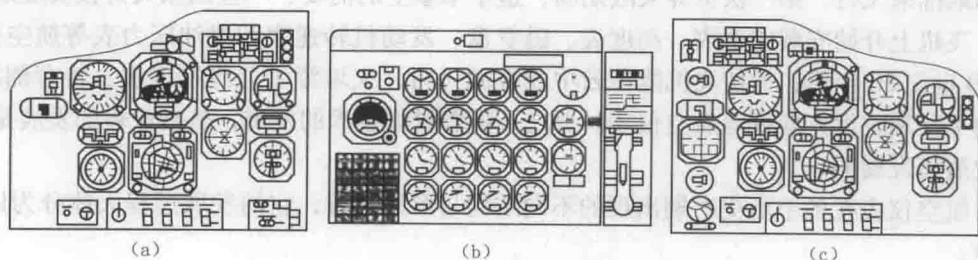


图 1.1-1 典型机电式综合仪表及其布局

(a) 正驾驶员的飞行仪表；(b) 发动机仪表；(c) 副驾驶员的飞行仪表

5. 电子综合显示仪表阶段

随着电子技术的飞速发展,从20世纪60年代开始出现电子显示仪表,电子显示仪表逐步取代了指针式机电仪表,使仪表结构进入革新年代。到20世纪70年代中期,电子显示仪表又进一步向综合化、数字化、标准化和多功能方向发展,并出现了高度综合又相互补充、交换显示的电子综合显示仪表。驾驶员可以通过控制板对飞机进行控制和安全监督,初步实现了人一机“对话”。驾驶舱仪表、惯性导航系统、大气数据系统、自动飞行控制系统和飞行管理系统等已成为重要的航空电子设备。

20世纪80年代初期,在一些先进机型的驾驶舱中(如波音757/767、空客310),主要仪表的显示部分已广泛采用衍射平视仪和彩色多功能显示器,出现了EFIS(电子飞行仪表系统)和EICAS(发动机指示和机组警告系统),但是综合程度有限,仍配置有较多的机电仪表和备用仪表,这是电子飞行仪表的第一代产品。

20世纪80年代中后期,以波音747/400、空客320为代表的先进机型中的电子飞行仪表为第二代产品。彩色电子显示系统有了进一步的发展,出现了高度综合的电子飞行仪表系统,其特点是驾驶舱用大屏幕CRT(彩色阴极射线管)显示器显示数据,仅配置很少的备用仪表。

20世纪90年代的第三代电子飞行仪表为平板显示系统。仪表数据显示用液晶显示器(LCD)取代了彩色阴极射线管,它的显示亮度大且分辨率高,特别是具有体积小、重量轻、耗电量小等优点。例如,波音777客机驾驶舱的主要仪表显示采用的就是彩色液晶显示器。



1.2 航空仪表的布局与数据显示格式

1.2.1 航空仪表的布局

对于现代大型商业飞机的驾驶舱仪表显示来说,无论采用CRT,还是采用LCD,其驾驶舱的布局是基本相同的。如图1.2-1所示为典型电子综合显示仪表及其布局。

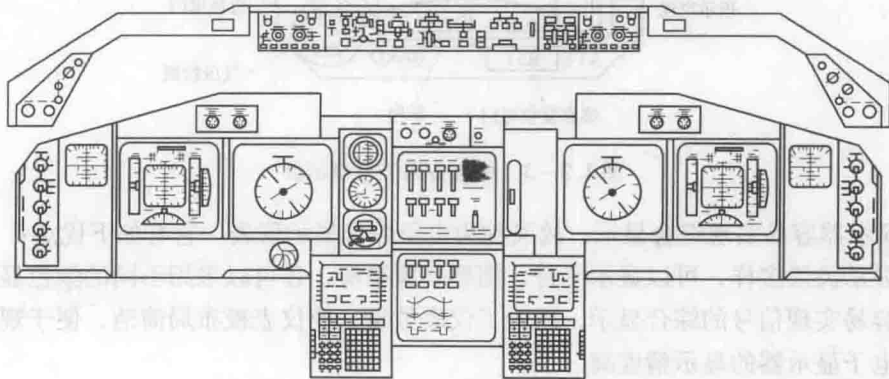


图1.2-1 典型电子综合显示仪表及其布局

与图 1.1-1 的仪表板相对应, 正、副驾驶员的飞行仪表板上有主飞行显示器 (PFD) 和导航显示器 (ND), 中间的发动机仪表板上有上、下 EICAS 显示器。在现代屏幕显示的驾驶舱中, 仍然保留了陀螺地平仪、气压式高度表、空速表三块指针式备用仪表, 三块备用仪表的表头图形如图 1.2-2 所示。

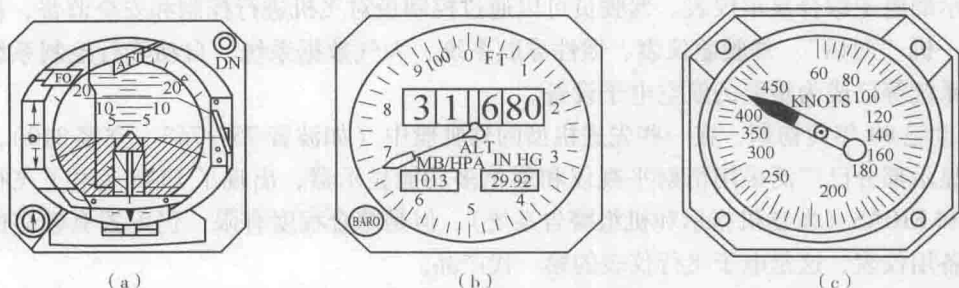


图 1.2-2 备用仪表的表头图形

(a) 陀螺地平仪; (b) 气压式高度表; (c) 空速表

在一些更先进的大型商业飞机上, 除具有电子飞行仪表外, 已经将备用姿态、备用高度、备用空速、航向罗盘、仪表着陆偏离指示和气压基准设置等指示器集成在一起, 称为综合备用飞行显示器 (ISFD), 用液晶显示器 LCD 作为仪表屏幕。它看上去就像小型的主飞行显示器, 在其前面板上有气压基准选择电门、指示窗、高度带、空速带、姿态盘、航向刻度盘和仪表着陆的偏离指示。在地面测试时, 可以提供故障代码、故障等级分类。仪表自带测试功能, 自备电瓶和充电器, 在紧急情况下可以连续供电 150 min。故障时, 相应指示部分的故障旗出现, 如图 1.2-3 所示为综合备用飞行显示器。

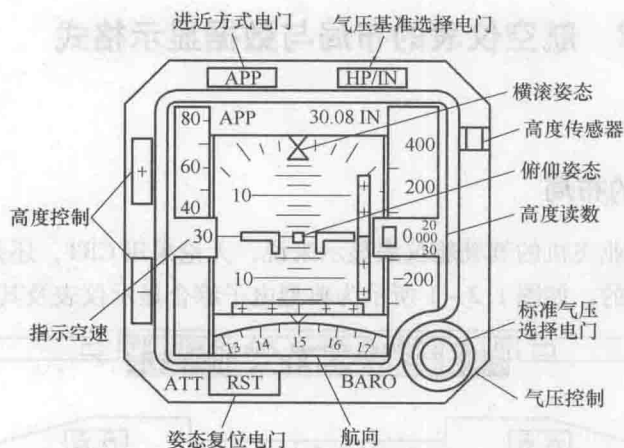


图 1.2-3 综合备用飞行显示器

电子显示器容易实现综合显示, 故又称为电子综合显示仪表。它有如下优点:

- (1) 显示灵活多样, 可以显示字符、图形、表格等, 还可以采用不同的颜色显示。
- (2) 容易实现信号的综合显示, 减少了仪表数量, 使仪表板布局简洁, 便于观察。
- (3) 电子显示器的显示精度高。
- (4) 采用固态器件, 寿命长, 可靠性高。

(5) 价格不断下降, 性能价格比高。

(6) 符合机载设备数字化的发展方向。

总之, 航空仪表的发展过程是从机械指示发展到电子显示, 信号处理单元从纯机械到数字、计算机系统, 仪表的数量经历了从少到多, 又从多到少的发展过程。从某种意义上讲, 驾驶舱显示仪表是飞机先进程度的重要标志之一。

1.2.2 航空仪表的数据显示格式

无论是分离式仪表显示数据的格式, 还是电子式仪表显示数据的格式, 都遵循基本“T”形格式。

1. 分离式仪表显示数据的基本“T”形格式

如图 1.2-4 所示为正驾驶员的飞行仪表板。从仪表板上粗黑线框处的形状可以看出, 左边的马赫—空速表、中间的姿态指引仪 (ADI)、右边的气压式高度表、下边的水平状态指示器 (HS) (或称为航道罗盘), 一起构成了“T”形格式, 这就是分离式仪表显示数据的基本“T”形格式。按照这种格式, 主要飞行参数的显示为: 空速、姿态、气压高度、航向。

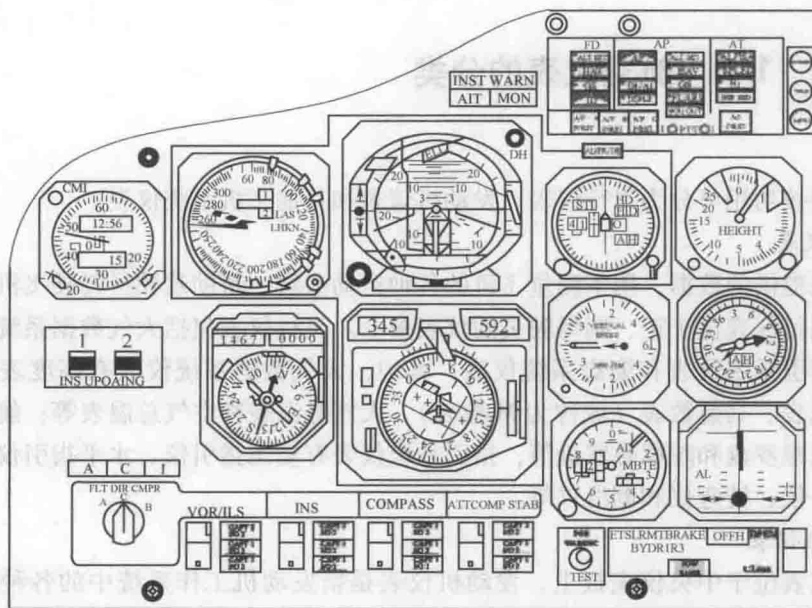


图 1.2-4 正驾驶员的飞行仪表板

即使是小型飞机驾驶舱中的飞行参数也以“T”形格式显示, 这种固定的格式可以为驾驶员提供方便。

2. 电子式仪表显示数据的基本“T”形格式

如图 1.2-5 所示为主飞行显示器 (PFD)。从显示器上粗黑线框处的形状同样可以看出, 左边的空速带、中间的姿态指引仪、右边的气压式高度带、下边的航向带也构成了“T”形格式, 这就是电子式仪表显示数据的基本“T”形格式。

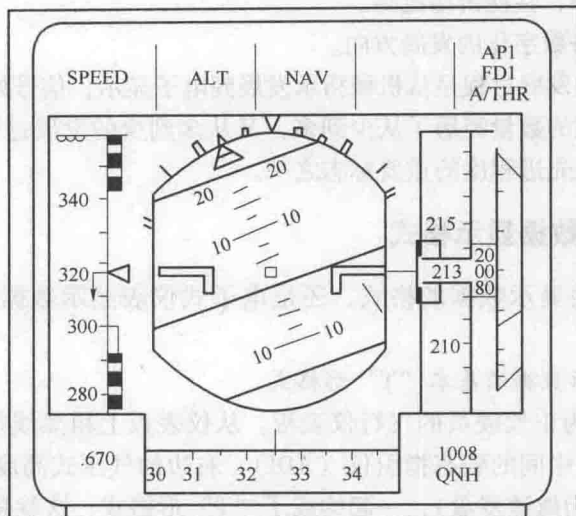


图 1.2-5 主飞行显示器

1.3 航空仪表的分类

航空仪表按功用可分为飞行仪表、发动机仪表和其他飞机系统仪表。

1. 飞行仪表

飞行仪表提供的数据，用于测量飞机的各种运动参数，帮助驾驶员驾驶飞机完成安全经济的飞行。飞行仪表位于正、副驾驶员的仪表板上。飞行仪表包括大气数据系统仪表、航向系统仪表、指引系统仪表和姿态系统仪表，其中，大气数据系统仪表有高度表、升降速度表、指示空速表、马赫数表（或称为 M 数表）、大气静温表和空气总温表等；航向系统仪表有磁罗盘、陀螺罗盘和陀螺磁罗盘等；指引系统仪表有姿态指引仪、水平指引仪等；姿态系统仪表有地平仪、转弯仪和侧滑仪等。

2. 发动机仪表

发动机仪表位于中央仪表板上，发动机仪表是指发动机工作系统中的各种参数测量仪表，如转速表（螺旋桨转速表、低压涡轮和高压涡轮转速表）、进气压力表和气缸头温度表（两表用于活塞式发动机）、扭矩表和排气温度表（两表用于涡轮螺旋桨发动机）、压力比表（或推力表）和排气温度表（两表用于涡轮喷气或涡轮风扇发动机）、燃油压力表（指汽油压力表或煤油压力表）、滑油压力表、滑油温度表、燃油油量表（指汽油油量表或煤油油量表）、燃油流量表、滑油油量表、发动机振动指示器等。

3. 其他飞机系统仪表

在飞机的其他系统或设备中使用的测量仪表统称为其他飞机系统仪表。如飞机的增压系统中有座舱高度表、压差表、空气流量表、升降速度表和温度表等；飞机的液压系统中有各种压力表和液压油油量表等；灭火系统中有各种压力表；此外，还有起落架收放位置表、襟

翼位置表和飞机电气设备用的电流表、电压表、频率表等。



1.4 模拟式/数字式电子仪表的优缺点

在飞机上,老式的空速表是模拟式测量仪表,指针在刻度盘上连续指示出空速值。驾驶员要想得到空速值就必须根据指针在刻度盘上的位置计算出来,这需要一定的时间。然而,如果驾驶员关心空速的变化趋势,则可以很快地通过指针的摆动方向判断出来。可见,驾驶员使用模拟式测量仪表具有获得准确数值慢,获得数值变化趋势快的特点。

现在空速值在主飞行显示器(PFD)上显示,它是典型的数字式电子仪表。从图1.4-1(b)中可以很清楚地看到,此时的空速值是30 kn^①。可以想象,如果数据仪以纯数字的形式显示,那么,对于数据变化趋势的判断同样需要一定的时间。因此,现代航空仪表均采用数字技术,而数据以数字和模拟两种方式显示,这样,驾驶员既可以较快地得到准确的数据,又可以较快地获得该数据的变化趋势,这是现代数字式电子仪表的特点。如图1.4-1所示为典型的模拟式和数字式显示器。

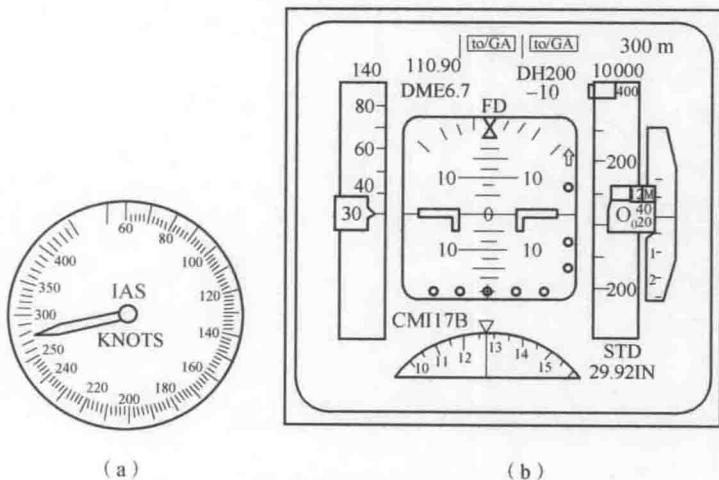


图 1.4-1 典型的模拟式和数字式显示器

(a) 模拟式显示器; (b) 数字式显示器



【思考与练习】

- (1) 航空仪表的功用是什么?
- (2) 航空仪表按功用可以分为哪几类?

^① kn 是节, 1 节 = 1 海里/时。

