

# 内燃机测试手册

〔日〕八田桂三 浅沼强 松木正胜 主编

机械工业出版社

以及排烟中微粒和臭气的测量方法。

此外，还研究利用激光全息摄影进行流动、气体温度、振动等的测量，这种方法由于也是非接触式的，可望今后会取得较大发展。

3) 对于活塞式发动机，特别是燃气轮机，除遥测和自动测量外，由于测点很多，借助于各种电子计算机的发展，显著地促进了数据处理的多样化和自动化。

除此之外，在本手册编纂过程中，特别注意的方面还有：对试验法和与此有关的标准尽量收集齐全；对于因篇幅限制而不能详述的内容，尽可能把参考文献列举在各章节的末尾。

(浅沼 强)

## 序

《内燃机手册》自1960年出版以来，已经过去十九年了。值得欣慰的是该书博得了超过预期的好评，对内燃机行业的发展起到了一定的作用。在这期间，活塞式内燃机和燃气轮机都取得了很大的发展，此外，内燃机的外部环境出现了公害问题、能源问题等过去未曾预料到的问题。根据这种情况，决定对《内燃机手册》进行修订。

在讨论具体修订工作的过程中，提出了一个想法，即把第一版《内燃机手册》中的第3篇关于试验、测量的部分单独分出来，首先编辑一本介绍内燃机测量和试验的最新知识及最新资料的《内燃机测试手册》。其理由是：第一，随着内燃机的进步及周围环境的变化，创造了大量新的测量、试验方法；第二，测试技术本身也取得了显著的发展，例如，各种传感器，尤其是遥感技术的发展；由于微型计算机的发展，开始对各种传递函数进行修正处理；变动现象的分析；相关、统计量等的运算处理；进一步还可使偶然性的瞬态现象测量等过去不可能或是很困难的测量成为可能，此外还有各种大规模试验的自动化等。

鉴于上述理由，我们决定在对旧版《内燃机手册》进行全面修订之前，先编辑出版《内燃机测试手册》。本手册由五章组成：第一章为流动、压力、温度及振动、噪声等基本参数的测量，燃料、润滑、排气的测定法以及测量记录装置等具有共性的内容；第二章及第三章对活塞式内燃机的测量和试验进行了详细的叙述；第四章为燃气轮机和喷气发动机各主要部件的试验和测量；第五章为整机的检查和试验。

在编辑本手册时，对下述三方面给予了特别的注意。1)对于象排气测量与试验那样全新的领域，尽可能写进去；2)对可能用无接触法进行实时测定的新测量方法（例如激光流速计和用光的燃气温度计等）进行重点介绍；3)对伴随电子计算机的发展而出现的完全自动化数据处理系统进行详细的叙述。由于对数目众多的项目都希望由各方面的专家执笔，因此各项目之间难免有些重复。此外，事前虽经多次讨论，但在写完后回头来看一下，也还存在内容的粗精、过简过繁等一些明显的不足之处，甚至还担心可能有遗漏的项目。对这些不足之处，希望读者不吝指教，以便在近期内修订或补充。

即使存在这些问题，但作者要把本手册编成一本集内燃机测试知识和资料大成的最初目标，可以认为已完全达到。如本书能对关心内燃机测试的各界人士有所帮助，这就是万幸的事了。

最后对百忙中参加本书编写的各位执笔人及对出版本书尽了很大努力的朝仓书店各位先生谨表谢意。

八田桂三

浅沼 强

松本正胜

1979年4月

## 执 笔 人

|       |                           |
|-------|---------------------------|
| 浅沼 强  | 东海大学教授、工学博士               |
| 八木静夫  | (株)本田技术研究所董事, 主任研究员、工学博士  |
| 近藤 博  | 航空宇宙技术研究所发动机部发动机性能研究室主任   |
| 田村敦宏  | 航空宇宙技术研究所发动机部主任研究官、工学博士   |
| 大东俊一  | 京都大学教授、工学博士               |
| 藤井昭一  | 航空宇宙技术研究所飞机公害第2研究组组长、工学博士 |
| 小保方富夫 | 群馬大学工业短期大学部讲师             |
| 山根 猛  | 三井造船(株)玉野研究所流体机械研究室主任     |
| 村木俊博  | 东京航空仪器(株)生产本部副本部长         |
| 松冈 信  | 东京工业大学教授、工学博士             |
| 西尾健二  | 航空宇宙技术研究所发动机部发动机控制研究室主任   |
| 吉田正一  | 埼玉大学教授、工学博士               |
| 高原北雄  | 航空宇宙技术研究所发动机部涡轮研究室主任      |
| 能濑弘幸  | 航空宇宙技术研究所发动机部传热研究室主任      |
| 千代木尚久 | 千叶大学教授、工学博士               |
| 小栗 达  | 横浜国立大学教授、工学博士             |
| 斎藤 孟  | 早稻田大学教授                   |
| 窪田昌史  | 五十铃汽车(株)研究试验部主任           |
| 子安 胜  | (财)小林理学研究所所长、理学博士         |
| 青野比良夫 | 石川岛播磨重工业(株)科长             |
| 吉田荣一  | 日本石油(株)中央技术研究所主任研究员       |
| 木村好次  | 东京大学宇宙航空研究所副教授、工学博士       |
| 鮎泽 正  | (财)日本汽车研究所第2研究部研究员        |
| 斎藤 隆  | 航空宇宙技术研究所飞机公害研究组研究员       |
| 柳原 茂  | 机械技术研究所汽车安全公害部长           |
| 八卷直臣  | 埼玉大学教授、工学博士               |
| 加藤 聪  | (株)日本无公害发动机研究所研究员         |
| 小野义一郎 | (株)小野仪器制作所经理、工学博士         |
| 五味 努  | 上智大学教授、工学博士               |
| 泽 则弘  | 茨城大学教授、工学博士               |
| 宫部英也  | 明治大学教授、工学博士               |
| 浜本嘉辅  | 京都大学副教授、工学博士              |
| 鱼住顺藏  | 爱三工业(株)董事长                |
| 饭沼一男  | 东京大学教授、工学博士               |

- 仓林俊雄 群馬大学教授、工学博士  
 神本武征 東京工业大学助教、工学博士  
 广安博之 广岛大学教授、工学博士  
 染谷常雄 东京大学教授、工学博士  
 东野一郎 大阪市立大学教授、工学博士  
 绪谷和夫 机械技术研究所基础部燃烧工程科主任研究官  
 荻原和典 交通安全公害研究所交通公害部长  
 徐 锡洪 (株)日本无公害发动机研究所技术部长、工学博士  
 酒井靖郎 日产汽车(株)第三发动机设计部部长  
 户田忠秀 丰田汽车工业(株)东富士研究所第11研究部代部长  
 林 洋 (财)日本汽车研究所调查室主任、主任研究员、技术士  
 福间雄一 日野汽车工业(株)第3研究部部长  
 铃木作良 (社)日本汽车零件工业会技术部长、技术士  
 高濑谦次郎 (株)小松制作所小山工厂发动机开发中心所长  
 明石光一郎 三菱重工业(株)技术本部长崎研究所第二实验科长  
 宝诸幸男 广岛大学教授、工学博士  
 三原省三 柴油机(株)常务董事、研究开发部部长  
 山崎 勉 日本电子机器开发部副部长  
 山中 正 日本电装(株)董事、第一事业部部长  
 大山耕一 航空宇宙技术研究所发动机部压缩机研究室主任  
 蓑田光弘 航空宇宙技术研究所发动机部叶栅研究室主任  
 铃木邦男 机械技术研究所基础部燃烧工程科科长  
 山木 岩 川崎重工业(株)喷气发动机事业部质量管理部部长  
 木下啟次郎 日产汽车(株)中央研究所新动力研究部部长  
 伊藤源嗣 石川岛播磨重工业(株)航空宇宙事业部技术开发室科长  
 金子益男 日本航空(株)驻美洲主任技术员

(按执笔顺序排列)

## 前 言

1876年问世的奥托内燃机在原理上和结构上可以说与现今的四冲程内燃机是完全一样的。如把奥托内燃机的问世看作是内燃机的诞生,则已过去100多年了。在这期间经历了两次世界大战,每一次战争都使内燃机得到飞速的发展。现在活塞式内燃机和燃气轮机在陆上、海上及空中等所有领域的保有量,除大功率火力发电站以外,在热机市场中已处于独占地位。

近十年来,内燃机技术的进步实在是非常显著的,可以说这主要是由于最近实施的严格的环境标准和对节能的强烈要求。即1968年开始实施的汽油机排气标准,及其后实施的柴油机排气标准,都几经修订,更加严格。此外,对生活环境有直接影响的噪声也作了更加严格的规定。

另一方面,以1973年的石油危机为转机,对石油资源进行重新评价的同时,对包括燃料在内的所有资源的有限性有了新的认识。根据这种观点,对现用内燃机的改进和进行新燃料、新内燃机的开发齐头并进,对新构思下的内燃机或外燃机,或是它们的混合机的各种设想,继续作比较研究。得出的结论是,肯定了以暂用现有发动机达到公害标准和改善燃料消耗率为目标。这个结论是各研究机关积极开展认真的开发研究的结果,在这些开发研究过程中,不可忽视的另一成果是,新试验法的制定、测量方法的显著发展及新测量方法的实用化等。

过去对内燃机规定了两种试验,一种是为确认内燃机新产品各项性能是否达到设计要求的定型试验,另一种是为销售所必需的验收试验。定型试验是确认输出功率、燃料消耗率等性能和耐久性、可靠性等性能,即确认内燃机能否实用。对这种试验,世界各主要国家已经达到某种程度的标准化,近来ISO(国际标准化组织)也有把标准统一起来的趋势。验收试验是把鉴定试验作某些简化的试验。除此之外,最近还对排气及噪声作了规定,故又制定了新的试验法,但对新试验法也提出了某些异议。例如,对排气试验法,排气的规定值逐年严格,测定的误差和不可避免的测量误差(试验装置固有误差、取决于试验操作和环境的误差以及排气分析带来的误差等)与规定值的允许范围的相对关系成为一个待解决的问题。这些问题虽也有试验方法方面的,但应看到大部分还在于进行试验时使用的测量仪器或测量方法本身。

一般说,测试方法有两种,一种是一直在定型试验、验收试验及按照新公害法规制定的试验中使用,已正式制定的测试方法。这些试验必须是技术上已经成熟、稳定,并且准确度高。第二种是要使定型试验合格,专为内燃机的研究开发而用的先行一步的测试技术。例如象排气净化和燃料经济性,要解决某些互相矛盾的要求,就有必要更深入地掌握和理解内燃机的燃烧现象,最好作一些燃气的流动、压力、温度及组成浓度等项的实时测定。这些测试方法都在近十年内取得了划时代的进展,取得了足以夸耀的成果。仅从这一例子也可以说明,近期测试方法的创造性发展是促使编辑本手册的主要原因。

所谓测试,就是把对测定对象的数量上的认识用准确的数据表达出来,所以

1) 必须对测定对象(这里是内燃机)有充分的预备知识。

2) 根据这些知识,就能明确测试的目的和选择合适的测试方法。即必须根据选定的应测物理量及精度要求、测试所需的时间、在测试过程中测定对象的状态是否变化、以及测试结果的表示方法等,来选择测试方法。

3) 确定测试方法后,设计出测量变换后所必需的测量系统,并进行测试装置的装配和调试。此外,必须预先对测试装置进行检定,以确认其功能是否正常。

4) 在开始测试之前,要整備好测定对象和装置的环境,创造一个好的测试条件,然后在规定的操作下,按正确顺序进行测定,并对数据进行记录。

5) 最后,对所得的测试结果进行适当的存储、处理及显示,然后对数据进行研究分析。

在这些测试中,偶而也采用对被测对象物理量进行直接测定的方法,一般都是利用被测物理量的变化转换成其它性质物理量的传感器进行间接测定。还有,作为测试方法,往往采用零位法或修正法。现在,对于内燃机的测试,特别应具备的主要条件有:

1) 在测试时,应不对测定对象产生任何影响。最好采用无接触测量法,如激光多普勒流速计、激光全息干涉法等,而不要象皮托管流速计、热线流速计那样把传感器插入流体之中。

2) 当对不断变动的现象进行测量时,要用响应性很快的测量仪器,以得到准确的记录。即不仅是传感器,而且包括传递装置在内的整个测量系统的振幅及相位的频率特性在必要的范围内都要稳定。

3) 比以周期性变化为前提的断续测定更加要求整个时间变化过程中的实时测定。此外,过去很多测量只能对点进行测定,而现在希望能对线或面进行直接测定。

4) 测试的范围应宽广,且容易改变灵敏度。在测定对象的状况变化时,不一一更换测量仪器就能进行测试。此外,能对应状态变化随时调整灵敏度,这样对测试很方便。

5) 可进行静态检定,且能长时间有效。在间接测定时不用说必须进行检定,但希望在测试期间这种检定能一直有效。假如不是这样,就必须进行反复多次检定,这时要求很容易作静态检定。

6) 对有关连的项目应能同时记录,并能进行自动处理和显示。在对有关的几个项目需要同时测定,或是以了解某一测定项目的分布为目的时,往往要对很多点的数值作同时记录。这时取到的数据量很大,就必须考虑自动数据处理。

7) 不应该受温度、压力及振动、噪声的影响。这本来是测试仪器总体设计时应考虑的问题,如果上述参数对测试结果产生影响,应能及时修正。

8) 应具备耐久性好、操作容易等条件。

在测试时,不应忘记对实测值与真值、估计值的差值,即测定误差进行研究分析。例如误差的主要原因是测试原理的问题,还是由测定装置产生的,还是由测定环境或是测试条件产生并能修正的,再或是由测定者产生的等,对此要进行认真的分析。

内燃机的测量和试验虽并不是很特殊的内容,本书为叙述上的方便,分下面五章。

第一章以基本量的测量为题,叙述转速、流动、压力、温度、振动、噪声及排气等基本量的测量,内燃机中具有共性的燃料和润滑的测试、从运动体取出信息的方法以及测试记录装置等。对于排气制定了新的标准,因此,介绍了它的取样法、气体分析法以及排烟中微粒及臭氧等的测量法。在流动的测量中,还列举了放电法、激光流速计法等最新的方法,以及

流动的可视化法等。在固体或气体的温度测定中,具有非接触、高响应性等特点的利用光的测量法取得了显著的进步,某些方法已在实时测定活塞式发动机着火运转时的燃气温度中取得成功。此外,利用激光全息摄影干涉法进行燃气温度和火焰传播测量的工作也已开展。因此,对这些温度测量的介绍占了较多的篇幅。此外,适应测量环境的多样化,从行驶或飞行物体及高速旋转物体等中取出信息的技术;以及兼备存储、处理及显示功能的模拟和数字记录装置的进展往往依赖于电子工程,故对这些最新情报也作了详细介绍。

第二章除介绍了活塞式内燃机传统的测量方法,如内燃机各参数、气体交换、混合气燃烧、喷雾的燃烧、热损失以及摩擦损失等以外,还介绍了对这些测定结果进行处理的数据处理系统。本章中应特别提到的是,对汽油机混合气的空燃比和火焰传播,柴油机燃料喷雾的粒径分布、喷射速率、燃烧等的测量作了详细的介绍。这些都可以说是为适应排气规定,近年来发展最迅速的领域。此外,活塞式发动机的数据处理系统(例如示功图的分析)开始采用计算机,能进行迅速的自动处理,对这些也作了详细的介绍。

第三章以活塞式内燃机的试验为题,介绍了整机及各附件的检查和试验方法。对于内燃机整机,介绍了日本及其他国家关于内燃机性能、环境、耐久性、排气及噪声的各种试验法。对于附件,把进排气系统、冷却系统、增压系统、燃料供给系统、电气系统等试验法都作了介绍,这对读者是很方便的。

第四章为燃气轮机和喷气发动机零部件的试验和测量。在容积型的活塞式内燃机上,即使在稳定运转时,包括气缸内燃气在内的各种状态变化必须看作是随时间而变化的瞬态变化的连续。与此不同,在速度型的燃气轮机上,除了起动时的瞬态运转外,发动机内的气体流动和燃烧一般都可以看作属于稳定状态变化。因此,对于构成燃气轮机的零部件,如压气机、燃烧器以及燃气涡轮的测试,与活塞式发动机相比确实要容易一些。可是对燃气轮机来说,必须了解更大范围的压力、温度、流速以及燃气成分浓度等的空间分布,故必须对较多的测试点迅速进行巡回测量。对由此而得的数据,则一定要用计算机进行自动化处理,在这些方面的进展是十分显著的。本章在介绍新开发的测试技术的同时,对这些数据处理系统也作了详细的叙述。

最后的第五章以燃气轮机和喷气发动机的试验为题,介绍了陆用、船用和汽车用燃气轮机及喷气发动机的检查和试验。其中的喷气发动机,根据用途的性质,过去就制定了最严格的试验法,而且关于维修、保养的检查和试验也不允许有一点差错,所以都要进行合理的自动化测试,这些测试方法在很多方面可以作为燃气轮机测试的样板,对从事活塞式发动机工作的专家也很有参考价值。

本书的内容主要就是上述这一些,而作为其特色,可重点列举下述的近年来发展最快的测试技术。

1) 按照最新颁布的内燃机低公害和节能法规,测试对象的范围显著扩大。例如,由于新制定了活塞式发动机排气试验法和测量法,其结果,象过去那样用压力测定来分析燃烧过程就显得不够了,需要更详细的测试,即要求对温度、流动以及燃气组成浓度等的时间和空间分布进行测试。

2) 对于新开发的、或正在开发的测试方法,例如激光多普勒流速计和各种利用光的温度测量法,由于是非接触式的,对发动机内的流动和燃烧反应等没有任何影响,并且可以实时测量,所以受到重视。此外,在与排气有关的测量中,新开发了气体取样法、气体分析

# 目 录

## 前 言

### 1. 基本参数的测量

|                        |     |                            |     |
|------------------------|-----|----------------------------|-----|
| 1.1 转速的测量 .....        | 1   | 1.8.3 噪声测量的标准 .....        | 129 |
| 1.1.1 接触法 .....        | 1   | 1.8.4 测量仪器 .....           | 129 |
| 1.1.2 非接触法 .....       | 1   | 1.8.5 测定环境 .....           | 132 |
| 1.1.3 从转轴以外检测 .....    | 2   | 1.8.6 测量方法 .....           | 133 |
| 1.1.4 转速波动的测定 .....    | 2   | 1.9 从运动体取出信息的方法 .....      | 134 |
| 1.2 流动的测定 .....        | 4   | 1.9.1 传送装置 .....           | 134 |
| 1.2.1 流速 .....         | 4   | 1.9.2 滑环法 .....            | 135 |
| 1.2.2 流量 .....         | 33  | 1.9.3 遥测法 .....            | 136 |
| 1.2.3 流动的显形 .....      | 47  | 1.9.4 旋转耦合器 .....          | 136 |
| 1.3 压力的测量 .....        | 58  | 1.10 燃料的测量 .....           | 137 |
| 1.3.1 静压 .....         | 58  | 1.10.1 内燃机用燃料的标准 .....     | 137 |
| 1.3.2 动压 .....         | 60  | 1.10.2 燃料消耗量的测定 .....      | 140 |
| 1.4 温度的测量 .....        | 68  | 1.10.3 抗爆性的测定 .....        | 142 |
| 1.4.1 固体温度 .....       | 68  | 1.10.4 一般特性自动试验器 .....     | 145 |
| 1.4.2 燃气温度 .....       | 82  | 1.11 关于润滑的测量 .....         | 146 |
| 1.5 热流量的测量 .....       | 104 | 1.11.1 表面损伤的测量 .....       | 146 |
| 1.5.1 热流量的定义 .....     | 104 | 1.11.2 润滑油消耗量的测定 .....     | 147 |
| 1.5.2 定常热流量 .....      | 104 | 1.11.3 润滑油循环的测量 .....      | 148 |
| 1.5.3 非定常热流量 .....     | 105 | 1.11.4 润滑油一般特性的测量 .....    | 148 |
| 1.5.4 辐射热流量 .....      | 108 | 1.11.5 润滑油实用性能的实验室测量 ..... | 149 |
| 1.6 功率、扭矩的测量 .....     | 110 | 1.11.6 用发动机测量润滑油性能 .....   | 150 |
| 1.6.1 测定原理 .....       | 110 | 1.12 排气测量 .....            | 151 |
| 1.6.2 吸收式测功器 .....     | 111 | 1.12.1 取样法 .....           | 151 |
| 1.6.3 传动测功器(扭矩仪) ..... | 115 | 1.12.2 气体分析 .....          | 164 |
| 1.7 振动的测量 .....        | 118 | 1.12.3 微粒的测量 .....         | 174 |
| 1.7.1 内燃机的振动 .....     | 118 | 1.12.4 臭气的测量 .....         | 180 |
| 1.7.2 振动测量的原理和实例 ..... | 119 | 1.13 测量用记录装置 .....         | 184 |
| 1.7.3 振动测定法 .....      | 122 | 1.13.1 记录装置的分类 .....       | 184 |
| 1.7.4 振动测定的例子 .....    | 123 | 1.13.2 模拟记录装置 .....        | 185 |
| 1.8 噪声的测量 .....        | 126 | 1.13.3 数字存储装置 .....        | 187 |
| 1.8.1 测定量 .....        | 126 | 1.13.4 磁带机的实例 .....        | 191 |
| 1.8.2 声功率级 .....       | 128 | 1.13.5 多路记录 .....          | 192 |

### 2. 活塞式发动机的测量

|                         |     |                     |     |
|-------------------------|-----|---------------------|-----|
| 2.1 发动机基本参数的测量 .....    | 195 | 2.2 换气 .....        | 197 |
| 2.1.1 止点 .....          | 195 | 2.2.1 充气效率的测量 ..... | 197 |
| 2.1.2 压缩比 .....         | 195 | 2.2.2 扫气作用的测量 ..... | 202 |
| 2.1.3 气门启闭时间 .....      | 196 | 2.2.3 涡流的测量 .....   | 213 |
| 2.1.4 点火正时与燃料喷射时间 ..... | 196 | 2.3 混合气的燃烧 .....    | 220 |

|                                |     |                                          |     |
|--------------------------------|-----|------------------------------------------|-----|
| 2.3.1 空燃比的测量 .....             | 220 | 2.6 机械损失功率的测量 .....                      | 258 |
| 2.3.2 火焰传播的测量 .....            | 230 | 2.6.1 示功图法 .....                         | 260 |
| 2.4 喷注的燃烧 .....                | 235 | 2.6.2 拖动法 .....                          | 261 |
| 2.4.1 喷注的测量 .....              | 235 | 2.6.3 停缸法 .....                          | 262 |
| 2.4.2 喷射率的测量 .....             | 240 | 2.6.4 威兰斯线(Willans-Line)法 .....          | 263 |
| 2.4.3 喷注燃烧的测量 .....            | 245 | 2.6.5 在实际运转中作用在每一个部<br>件上单件的摩擦力测量法 ..... | 263 |
| 2.5 热损失的测量 .....               | 252 | 2.7 数据处理系统 .....                         | 266 |
| 2.5.1 气缸内传热系数——循环平均<br>值 ..... | 252 | 2.7.1 活塞式发动机的数据处理 .....                  | 266 |
| 2.5.2 气缸内传热系数——瞬时值 .....       | 252 | 2.7.2 示功图的分析 .....                       | 271 |
| 2.5.3 辐射传热 .....               | 255 | 2.7.3 排气特性 .....                         | 283 |

### 3. 活塞式发动机的试验

|                     |     |                           |     |
|---------------------|-----|---------------------------|-----|
| 3.1 发动机的检查与试验 ..... | 292 | 3.2 附件的检查与试验 .....        | 334 |
| 3.1.1 发动机性能试验 ..... | 292 | 3.2.1 进排气系统与冷却系统的试验 ..... | 334 |
| 3.1.2 环境试验 .....    | 298 | 3.2.2 增压器试验 .....         | 337 |
| 3.1.3 耐久试验 .....    | 305 | 3.2.3 燃料系统的试验 .....       | 341 |
| 3.1.4 排气试验 .....    | 309 | 3.2.4 电气设备的试验 .....       | 354 |
| 3.1.5 噪声试验 .....    | 328 |                           |     |

### 4. 燃气轮机和喷气式发动机各组成部分的试验和测量

|                        |     |                      |     |
|------------------------|-----|----------------------|-----|
| 4.1 压气机的试验 .....       | 360 | 4.2.5 燃烧室性能的测量 ..... | 376 |
| 4.1.1 概述 .....         | 360 | 4.2.6 实验数据的整理法 ..... | 380 |
| 4.1.2 叶栅 .....         | 366 | 4.3 透平的试验 .....      | 383 |
| 4.2 燃烧室的试验 .....       | 373 | 4.3.1 概述 .....       | 383 |
| 4.2.1 燃烧试验 .....       | 373 | 4.3.2 叶栅 .....       | 390 |
| 4.2.2 燃烧室模型 .....      | 375 | 4.4 数据处理系统 .....     | 391 |
| 4.2.3 基础模型 .....       | 375 | 4.4.1 模拟数据处理 .....   | 392 |
| 4.2.4 相似准则, 尺寸效果 ..... | 376 | 4.4.2 数字数据处理 .....   | 393 |

### 5. 燃气轮机和喷气式发动机的试验

|                           |     |                                  |     |
|---------------------------|-----|----------------------------------|-----|
| 5.1 陆用船用燃气轮机的检查和试验 .....  | 404 | 5.3.1 试验规范 .....                 | 412 |
| 5.1.1 国际试验标准 .....        | 404 | 5.3.2 试验的种类和目的 .....             | 412 |
| 5.1.2 试验的种类 .....         | 404 | 5.3.3 测量 .....                   | 419 |
| 5.1.3 按用途所作试验和检查的实例 ..... | 404 | 5.4 喷气式发动机维修保养方面的检查<br>与试验 ..... | 421 |
| 5.1.4 主要测量项目 .....        | 408 | 5.4.1 检查和试验的分类 .....             | 421 |
| 5.2 关于汽车用燃气轮机的检查和试验 ..... | 408 | 5.4.2 发动机条件监控的分类 .....           | 422 |
| 5.2.1 发动机性能试验 .....       | 408 | 5.4.3 试验 .....                   | 423 |
| 5.2.2 环境试验 .....          | 409 | 5.4.4 滑油系统的检查和监控 .....           | 424 |
| 5.2.3 耐久试验 .....          | 409 | 5.4.5 硬设备的检查 .....               | 424 |
| 5.2.4 噪声试验 .....          | 410 | 5.4.6 发动机性能监控 .....              | 425 |
| 5.2.5 排气试验 .....          | 411 |                                  |     |
| 5.3 喷气式发动机的检查和试验 .....    | 412 |                                  |     |

# 1. 基本参数的测量

## 1.1 转速的测量

对于转速的测量，很早以来就提出了各种方法，并得到了普及。但近年来，随着电子技术的发展，研制成功了不少高精度、高响应的转速计，因此必须根据使用目的进行适当的选择。转速计一般由检测器和显示器两部分组成，并可以分成三大类：检测器与旋转轴接触的接触法，不与转轴接触的非接触法及从转轴以外检测的方法。

### 1.1.1 接触法

接触法中有机械式和电气式等方法。机械式以哈斯勒式和离心式为代表。哈斯勒式转速计是把计数机构和计时机构组合在一起，使用方便，早就得到应用。离心式转速计是利用重块的离心力与转速的平方成正比的原理工作的。这些转速计的测定范围多数在10000r/min左右，并且难以远距离指示<sup>[1]</sup>。

电气式的代表有发电机式和脉冲式。发电机式做成直流或交流发电机的结构，利用感应电压与转速成正比的原理进行测量，直流式适合于进行低速测量。脉冲式是利用转速与频率成正比的原理，做成一种多极的发电机结构，利用感应电压的频率进行测量。这时一般采用数字式，所以可进行高精度测量。此外，由于发电机式不需要外部电路，故可靠性较高。测定范围多数为10000r/min左右。

### 1.1.2 非接触法

非接触式中有脉冲式和同步式两种。脉冲式如图1.1所示，把从转轴检测到的脉冲信号用波形整形电路整形，利用石英发振器的基准信号制成的门脉冲，把门电路打开一定时间，对在此期间进入的脉冲计数以求得转速。这种方法是直接处理这些数字量，能够提高精度，但由于下述原因会引起误差：(1)因门的开闭产生非同步误差( $\pm 1$ 脉冲)；(2)基准信号的频率误差；(3)分割脉冲发生器时产生的分割误差。为了减小第(1)项误差，可以增加脉冲数或延长门的开闭时间。

在脉冲式中还可分成磁电式和光电式，磁电式中有电磁感应型和磁电变换型等，光电式

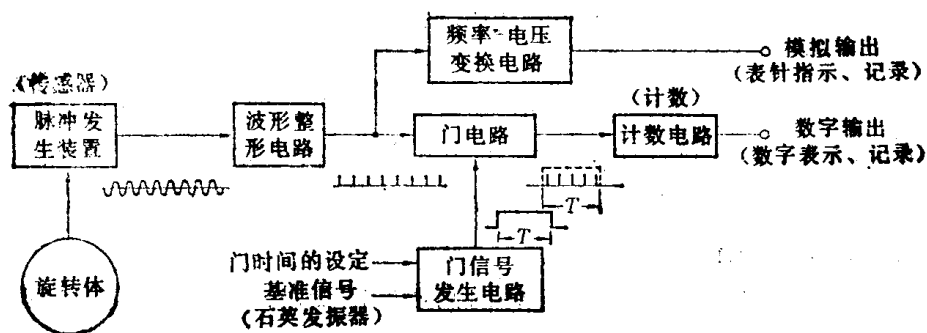


图1.1 脉冲式转速计的方块图

中有透光型和反射型等。

#### a. 磁电式

电磁感应型是把内装线圈和磁铁的传感器靠近装在转轴上的磁性体齿轮(脉冲发生器), 利用脉冲发生器旋转时产生的磁通变化感应出的电压进行测量。磁通变化的响应极限可达100kHz, 但在低转速时输出电压较低, 必须增加磁性体齿轮的齿数。

磁电变换型是把磁铁及磁电变换元件装在传感器内, 把磁通变化作为电阻变化输出, 以进行测量。与电磁感应型不同, 它可以从静止状态开始测量。

此外, 在磁电式中, 如遇到在转轴上不能安装磁性体齿轮的情况, 则可将旋转体的一部分(如螺母)磁化, 或利用键槽的凹凸来测定转速。

#### b. 光电式

透光型是在转轴上装有带缺口的圆板, 在板的前后固定上投光和受光元件, 检测光脉冲就可测出转速, 并可从停止状态开始测量。由于响应频率很高, 可用缩短缺口间距和增加脉冲数来提高测量精度。

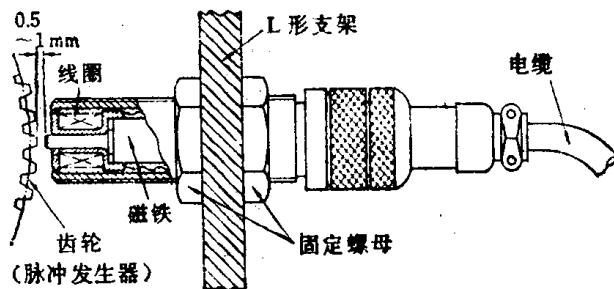


图1.2 磁电式转速计

反射型是在转轴上贴上反射带, 把反射光的断续变化转换为脉冲信号, 测定非常简单。但是, 在多脉冲化时, 必须注意反射带的粘贴间距误差。

#### c. 同步式

典型的同步式转速计是闪光测速仪, 这种型式是用闪光测速仪发出的脉动光打在装于转轴上的标记, 调整发光频率, 使标记看起来象静止不动一样, 由这个频率就可直接读取转速, 测量转速可达25000r/min, 精度约为1%。

### 1.1.3 从转轴以外检测

#### a. 电磁感应型

在火花点火发动机上, 每次点火时从线圈泄漏的磁通和初级线圈周围的磁通都发生变化。用检测线圈把这种磁通变化变换为脉冲电信号, 就可求得转速。这种方法不必对旋转体进行加工, 测量很简单。测量范围一般为10000r/min。

#### b. 压电型

在压缩着火发动机上, 把高压油管中的脉动压力用压电元件进行检测, 就可求出转速(图1.3), 操作很简单。测定范围为5000r/min左右。

#### c. 频率分析型

从旋转体产生的各种频率(声响、振动、光等都可以)中, 选取与转速成正比的频率(1次成分), 以求出转速。在分析法中, 有相关法, 富里叶变换法等。测定范围2000~7000r/min, 精度要与处理的时间相适应, 实用上为2%左右。

### 1.1.4 转速波动的测定

在转速波动中, 有每转间的变动和一转内角速度的变动, 过去用模拟式的电压变动来求取。这种方法对前者的测定可以得到比较满意的结果; 但对后者的测定, 由于要求高响应、高精度, 就不大适合。因此, 最近研制了一种对后者也能测定的瞬时转速测量仪<sup>[3]</sup>。其方块

图如图 1.4 所示, 它是把输入频率的一周期 (脉冲发生器 1 个间距的旋转时间) 顺次进行高速的倒数运算, 求得每个周期的速度从而求出转速。即首先把通过波形整形电路的脉冲信号中的一个通入延迟电路, 使各脉冲延迟一定时间  $t_0$ , 然后作为启动指令输入函数发生电路; 另一个脉冲信号作为停止指令输入函数发生器。函数发生器产生的是双曲线函数, 即经过时间  $t$  的输出  $f(t)$  是与  $1/(t+t_0)$  成正比的函数。再将石英发振器来的基准信号输入此函数发生器, 高速算出脉冲发生器上被分割的每一一定微小角的转速。现在可测定到 20kHz (如把脉冲发生器分割 60, 转速为 20,000r/min), 这时的精度可

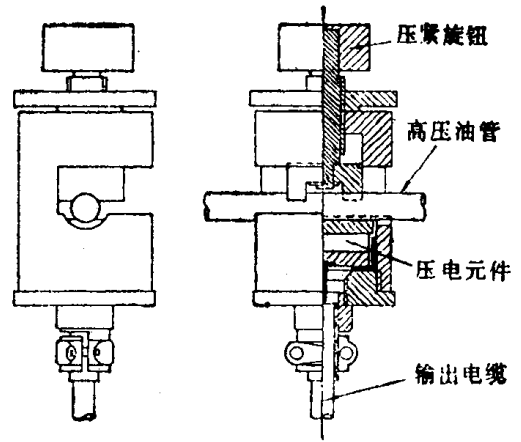


图 1.3 压电型检测器

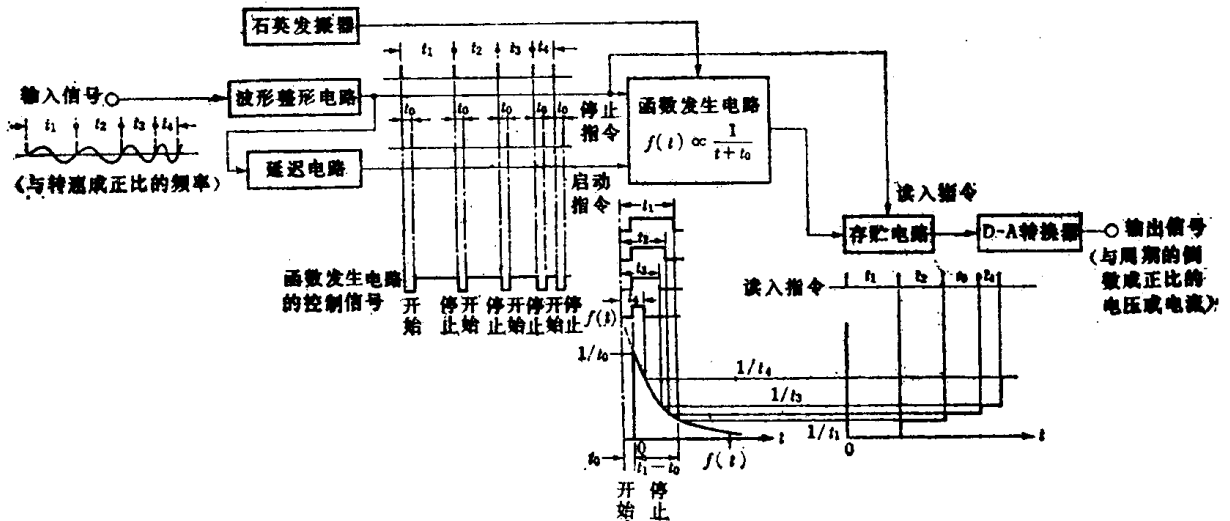


图 1.4 瞬时转速测定装置的方块图

函数发生电路: 接入开始指令时, 输出成为  $1/t_0$ , 经过一定时间, 输出变为与时间成反比例的  $1/(t+t_0)$ 。接着, 当接入停止指令时, 那个时刻的输出读入存贮电路。以后, 用下一个开始指令重复同样的动作

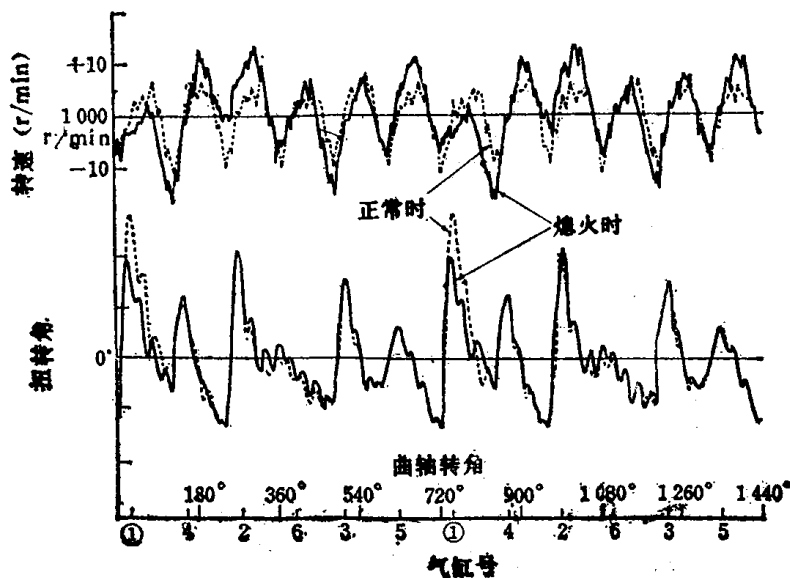


图 1.5 第 1 缸熄火时的扭转角和转速波动

达±0.5%。这种转速仪也能用于测定扭矩的变动。用这种转速仪测得的曲轴转速及扭矩变动示于图1.5。

(八木静夫)

## 参 考 文 献

- 1) 猪俣真三郎, 速度および回転 (計量管理技術双書 28), コロナ社.
- 2) 笹岡健三・進藤昭太郎, 携帯用光電式回転計, 横河技報, 9 (1965), 86.
- 3) デジタル演算方式の周波数-電圧変換器を製品化, *Nikkei Electronics*, 6-27 (1977), 40.

## 1.2 流动的测量

### 1.2.1 流速

#### a. 皮托管和偏流计

皮托管的名称是由Henri Pitot的名字命名的。1732年他把题为“关于测定水流速度及船速的仪器”的论文寄给法国科学院。此后, 流速测定管就往往称为皮托管。本节中将简要介绍皮托管和测定流动相对方向的偏流计。其中设测定对象主要是气体, 在流速测定过程中流体不发生相变(气相→液相等)。

i) 皮托管的基本计算公式 皮托管是插入流体中的一种管子, 利用附设压力孔测定流体的全压和静压, 由此就可求出流速。有时也把它特称为皮托静压管(Pitot-static tube), 以区别于仅有全压的情况(也称为皮托管, 依靠其他装置测定静压)。用下述的皮托管测得的全压和静压有各种误差, 但用预先进行校正试验的办法可基本上消除这些误差。正确测得气流(密度 $\rho$ 、比热比 $\kappa$ 、气体常数 $R$ )的全压 $P_0$ 及静压 $p$ 时, 根据流体力学中的伯努里定律, 计算流速 $v$ 的基础方程式为

$$\frac{1}{2} v^2 + \frac{p}{\rho \kappa - 1} = \frac{P_0}{\rho_0 \kappa - 1} = \frac{\kappa g R T_0}{\kappa - 1} = \frac{a_0^2}{\kappa - 1}$$

式中 $\rho_0$ 、 $T_0$ 、 $a_0$ 各表示利用等熵变化使流体处于截止状态时, 气体的密度、温度及紊流传播速度(音速),  $g$ 为重力加速度。设气流的马赫数为 $M$

$$M^2 \kappa \frac{p}{\rho} = v^2$$

$$\frac{v^2}{a_0^2} = \frac{2M^2}{2 + (\kappa - 1)M^2}$$

$$P_0 = p_0 \left\{ 1 + \frac{(\kappa - 1)M^2}{2} \right\}^{1/(\kappa - 1)}$$

当 $M \ll 1$ 时

$$P_0 = p + \frac{1}{2} \rho v^2 \left( 1 + \frac{1}{4} M^2 + \dots \right)$$

特别在 $M < 0.1$ 时, 在保证精度的情况下, 可看成是 $M = 0$ , 于是归结为包括液体在内的非压缩性流体的伯努里方程。

以上为忽略粘度影响时的结果, 如雷诺数大于某个数值, 可认为基本正确(参看iii)。如已知全温 $T_0$ 及比热比 $\kappa$ , 根据偏流计的指示(如为管路断面形状一定的直管内的气流, 可根

据管壁方向), 把皮托管正对测定气流, 测定 $p$ 及 $P_0$ 后就可求得 $M$ , 并由此就能算出流速 $v(T, p)$ 的测定方法参看1.4节)。

ii) 皮托管及偏流计的类型 按照皮托管的主要部分(带有压力测定孔的盖帽)的中心轴和气流的相对方向, 如图1.6所示可分为下列三种:

(1) 平行管(支承用圆管与流体方向成直角)(图1.6的①);

(2) 悬臂管(也称为皮托筒)(图1.6的②);

(3) 两端支承管(两端支承在气流外面)(图1.6的③)。

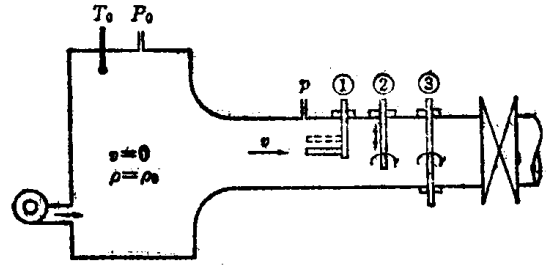


图1.6 皮托管的类型

$P_0$ —全压  $p$ —静压  $T_0$ —全温  $\rho$ —密度

第(1)种具有包括测定边界层用的各种测量头<sup>[1]</sup>。以制造者的名字命名的 Prandtl 型、NPL 型等多种皮托静压管也属于这种型式。偏

流计从原理上讲是一种利用对着气流方向的楔子两侧的压力差来测出相对风向的量仪, 作为应用的一例也属于第(1)种<sup>[1]</sup>。在测定实际的复杂流动时, 由于全温、全压、静压及风向必须要在同一检查面上测定, 所以多数是在一个圆管上支承各种测量头。现有用远距离驱动使这种圆管旋转及移动, 正如第(2)种悬臂管一样是可动的, 在这里为使测量头的颈部任何时候都与圆管的转轴中心保持一致, 使用被称为眼镜蛇探头的弯曲圆管。在没有微动装置下测定流速分布时, 有把几个相同的测量头在一个圆管上排列成梳形管使用的, 也有在流路中用导风板代替圆管的变型梳形管的, 这可算是第(3)种的应用。第(2)、第(3)种的断面形状一般全是圆形, 配有便于转动和移动的长管, 在第(2)种中, 压力孔通常设在管端附近, 在第(3)种中则通常布置在管的全长上。在使用第(2)种时, 由于因自由涡流的流出, 在管前端的压力分布出现特殊的3维流效应(终端效应), 因此要进行慎重的检定<sup>[2]</sup>。

### iii) 全压测定误差

1) 相对风向的影响(yaw及pitch特性)图1.7为平行管的皮托管在低速时的迎角特性。指示全压和实际全压的差值 $\Delta h$ (除以动压 $\rho v^2/2$ , 变为无量纲数)随迎角增加而增加<sup>[3]</sup>。迎角特性随 $M$ 值而变化。

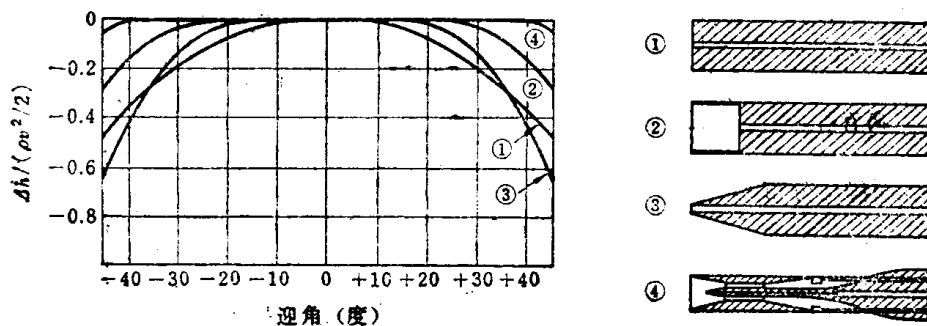


图 1.7

2) 剪断流的影响 在剪断流中, 全压管即使正对气流方向, 也不能表示与轴心处于同一直线上的气流的全压<sup>[4]</sup>。由于偏流计中作为判定风向基准的楔子两侧的压力差和速度差的

影响叠加, 故必须要研究气流的全压梯度, 对指示值进行修正。

3) 脉动流的影响 由于受皮托管以及连接管的时间常数的影响, 测得的全压平均值不一定等于外加在压力孔上的全压的时间平均值<sup>[6]</sup>。

4) 雷诺数的影响 设皮托管外径为代表长度, 如雷诺数为500以上, 在平行管中没有影响, 静压孔位置也容易确定<sup>[1]</sup>。在两端支承管的型式中无此优点, 但距歧点  $40^\circ$  圆周角范围内表面压力的影响不明显。

5) 马赫数的影响 在超音速流中插入全压管会产生冲击波, 因此指示的是冲击波下流的压力。设冲击波前方的全压和静压各为  $P_{01}$  和  $P_1$ , 后面的全压为  $P_{02}$ , 由于  $P_{02}/P_1$  是  $M$  和  $\kappa$  的函数(Rayleigh的超音速皮托管公式), 测定  $P_1$  和  $P_{02}$ , 与检定结果作比较就可求得  $M$ , 从(i)项的基本公式就可算出  $P_{01}$ 。在测定  $P_1$  时, 考虑冲击波的影响, 要使用作了检定的静压管(参看图1.11), 或利用上流壁面静压孔。在测定  $P_{02}$  时, 只要不产生气阻, 也可用插入两端支承管的办法<sup>[7]</sup>。可是有必要用缝壁<sup>[8]</sup>或孔壁来抑制产生的冲击波的反射及冲击波和壁面边界层的干涉。

#### iv) 静压测定误差

1) 皮托管表面压力分布的影响 图1.8为低速测量使用半球形管端的测量头时 (JISB 8330中采用), 管端对表面静压的影响<sup>[10]</sup>。图1.9为低速测量使用与图1.8同一型号的测量头时, 圆管对表面静压的影响<sup>[11]</sup>。实际上, 迎角特性<sup>[12]</sup>和马赫数的影响也必须考虑。

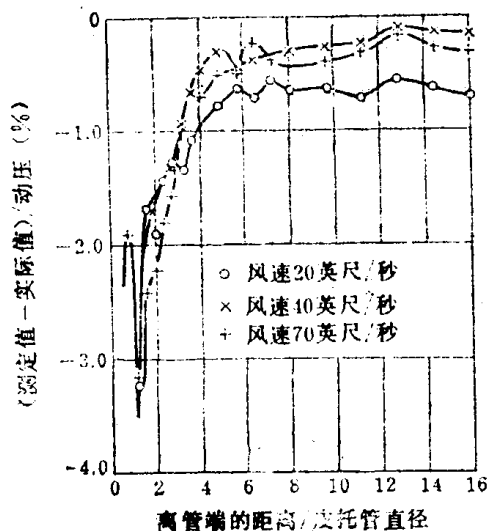


图1.8 皮托管表面静压分布的例子(管前端的影响)

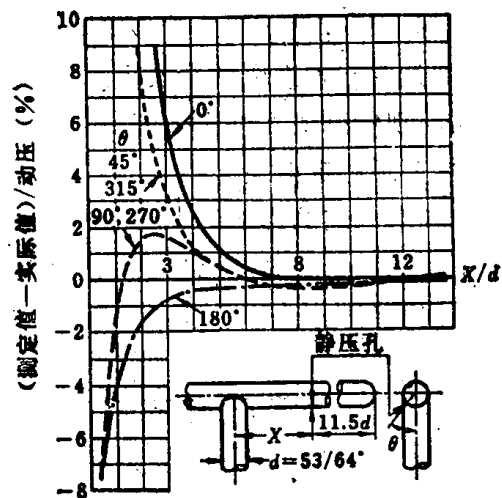


图1.9 皮托管表面(位置  $X$ 、 $\theta$ )静压测定例(圆管的影响)

2) 相互干涉及自由表面的影响 把皮托管放在气流边界近旁时, 通常的校准试验结果无效。边界和管的间隔必须保持大于管的外径<sup>[1]</sup>。在JISB 8330 (鼓风机试验法) 中也考虑了相互干涉的问题, 对皮托管的布置作了限制。与本项有关的研究报告极少, 对上流物体的后流和管自身的闭塞效应要加以注意。

▼) 校准法和校准曲线 为了校正而给予相对风速的常用方法有：(1)用转臂产生的方法；(2)用风洞气流产生的方法<sup>[13]</sup>。第(1)种方法因大气扰动而招致涡流的产生。第(2)种方法必须边检查气流的均一性和准确的局部风向边送风。图1.10为利用偏流计反转确定风向的例子(校准风洞)。作为(2)的代用而使用自由喷流时，要检查中心轴线上的静压梯度。为了缩短校准时间，要预先调整好专用装置，标准皮托管只许用于比较试验，要区别于实际使用的皮托管<sup>[13]</sup>。

皮托管在实际使用时要每次都正对着气流是困难的，所以因相对风向所产生的测定值变化(误差)要预先准备好校准曲线，校准对象是把给予相对风向的旋转圆板也包括在内，作为一种系统的皮托管。因而必须对皮托管的法兰面进行仔细的加工，以便能在实测时再现校准性能，当然，如果不对发动机本身的支承面进行精密加工，校准曲线也就没有什么意义了。校准

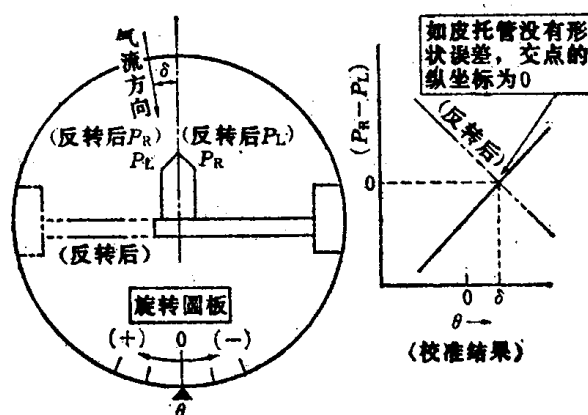


图1.10 风洞气流方向的确定

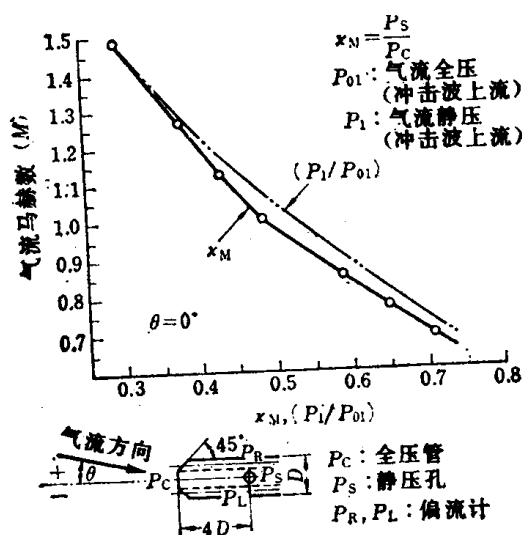


图1.11 利用在皮托管上加静压孔测定马赫数

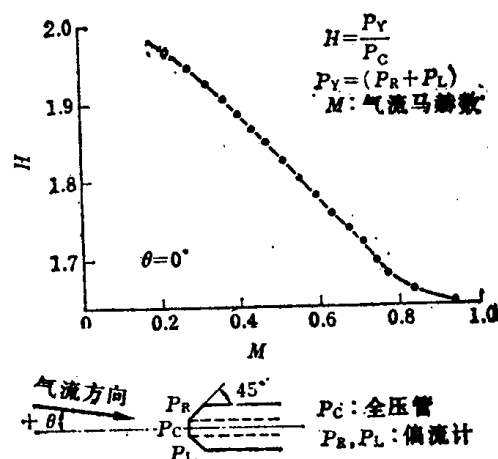


图1.12 利用偏流计测定马赫数

曲线的例子如图1.11<sup>[7]</sup>和1.12<sup>[14]</sup>所示，都是属于平行管的箭头形皮托管，但图1.11是使用装在全压管上的静压孔的指示压力算出 $M$ 值，而图1.12为偏流计兼有静压测定孔的功能。后一种方法在断面形状变化很大的流路中经常使用，但以往的例子只限于 $M < 0.8$ 的场合。对于两端支承管也能用同样的方法，但当管的表面在使用中被污垢和油弄脏时，则容易产生很大的误差。

(近藤 博)