

微型机械 与精密仪器

〔波〕 W·泰拉林斯基著

机械工业出版社



79.82
456

微型机械与精密仪器

〔波〕 W·泰拉林斯基 著

初允绵 等译

王良楣 校



机械工业出版社

8510630

DL6B/34 08

**FINE MECHANISMS AND
PRECISION INSTRUMENTS**

W. TRYLIŃSKI

Translated by A. Voellnagel

WYDAWNICTWA NAUKOWO-TECHNICZNE

WARSAW, POLAND, 1971

微型机械与精密仪器

[波] W·泰拉林斯基 著

初允绵 等 译

王良楣 校

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

河北省永清县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 23 $\frac{1}{4}$ · 字数 565 千字

1985 年 6 月北京第一版·1985 年 6 月北京第一次印刷

印数 00,001—7,400 · 定价 5.50 元

统一书号: 15033·5797

0020122

译 者 的 话

《微型机械与精密仪器》一书为波兰华沙工业大学微型机械与精密仪器教研室副教授 W. 泰拉林斯基 (W. TRYLINSKI) 所著。作者根据微型机械与精密仪器的特点, 从理论和实践方面比较系统和深入地介绍了组成它们的最基本的零部件、元件和机构的设计原理、计算和结构, 并着重分析了其发展中的综合问题。内容比较系统和丰富。

本书在内容和体系方面, 很接近苏联高等院校的教材, 书中较多的参考了苏联文献, 因此, 通过本书亦可了解到苏联在微型机械的精密仪器设计方面的情况。

由于我国高等院校仪器仪表类专业教学计划和课程设置的安排, 有关仪器零部件及机构设计的课程大多数与相近似的机械零件和机械原理课程合并, 关于微型机械和精密仪器零部件、元件及机构的设计原理和计算在现有教材中仅能论述最基本的内容, 而目前这方面的参考书和译著又很少。因此, 1981 年 7 月在哈尔滨工业大学召开的, 有十六所高等院校参加的《仪表结构设计基础》教学座谈会上, 经大家讨论推荐, 由哈尔滨工业大学公差与仪器零件教研室主持翻译此书, 作为仪器仪表类专业师生的教学参考书。

参加本书翻译的有初允绵 (前言、绪论、第十章部分), 张友仁 (第二、七、八章), 金长善 (第三、四章), 徐国东 (第五章部分), 陈文贤 (第五章部分、第十三章), 洪源芷 (第六章部分、第十一章), 竺培国 (第六章部分、第九、十二章), 王丕增 (第十章部分)。全书由初允绵、竺培国统译合稿, 并由机械工业部仪表局王良楣同志审校, 参加校订的有李敬, 张万静同志。

译者对原书的错误作了译注。

由于译者水平所限, 错误和不妥之处在所难免, 恳请读者批评指正。

译者

前 言

微型机械和精密仪器问世已有几百年的历史。随着自然科学的发展及适应实验室和测量的需要,促使微型机械和精密仪器的设计不断完善,但是,直到上个世纪,微型机械和精密仪器基本上还是由技工、艺匠设计制造。虽然钟表的工业化生产从十九世纪中叶已经开始,但微型机械和精密仪器的工业化生产是始于二十世纪。由于工业化生产的规模不断扩大,因此,设计工作便需要加以科学的研究。

十九世纪到二十世纪,由于电子技术和电子学的进步,促进了测量仪器的发展。在职工训练学校和高等院校里,需要设置关于微型机械和精密仪器设计原理的课程。这个时期,第一部关于微型机械和精密仪器结构部件的手册——G. 理基特 (G. Richter) 和 R. 沃恩沃斯 (R. von Voss) 合著的《精密机械元件》(1929)——出版了。这是一本很好的手册,堪称为各类典型设计指南的百科全书。可供具有中等专业学校毕业水平的技术人员使用。此后,类似的德文版手册相继问世。

苏联德罗兹多夫 (F. W. Drozdow) 所著的《精密装置与仪器零件》(1936年出版)一书首次从学术的角度对这一学科进行探讨。由于微型机械和精密仪器设计的范围非常广泛,除研究这种类型所有机械构件的手册外,其它一些著作,诸如电测、钟表方面的元件和特殊元件(如联接)的设计原理等也相继出版。

本书是为具有一定技术水平的设计人员编写的。它不是一本解决设计疑难问题的百科全书,它是以理论和实践为基础,介绍了微型机械和精密仪器的设计原理。微型机械和精密仪器的设计对它们能否进行大量生产和成批生产起着决定性的作用,因此,本书对这个问题给予特别的重视。

由于本书篇幅有限,笔者认为有必要略去对某些元件的陈述(如制动元件、制动器、振动阻尼元件等),而对最重要的、最基本的设计问题给予较详细的论述。出于同一原因,对一些极简单的元件(如常见的联接件),只做了简单的说明。对过去很少注意研究的问题,如元件发展中的综合问题则进行了广泛的讨论。调速器也从书中略去,因为肤浅的讨论只能无谓的增加书的厚度,不能解决实际问题。

本书试图对涉及的内容和材料做出不同于其它著作的新探讨。对于读者们的评论和指教,笔者将不胜感激。

目 录

译者的话

前言

第一章 绪论 1

§ 1-1 概述 1

§ 1-2 微型机械与精密仪器的特点 1

一、尺寸小和精度高 1

二、制造工艺对设计的影响 2

三、材料问题对微型机械与精密仪器设计的影响 2

四、微型机械与精密仪器的强度问题 3

§ 1-3 微型机械与精密仪器的分类 3

§ 1-4 微型机械与精密仪器中应用的

金属 4

一、一般要求 4

二、微型机械与精密仪器中常用的金属 4

§ 1-5 塑料 8

一、热塑性塑料 8

二、热固性塑料 9

§ 1-6 陶瓷材料 10

一、绝缘陶瓷 10

二、电容陶瓷 10

三、多孔性陶瓷 10

参考文献 10

第二章 壳体 and 机架 12

§ 2-1 壳体 12

一、防护外界环境有害的影响 12

二、防护机构 (仪器) 被非专业人员损坏 13

三、防护电流的影响 13

四、外型美观 14

五、阻尼振动和噪音 16

六、防爆 16

七、抗湿热及防护海洋性气候的腐蚀作用 16

八、重量轻 16

九、便于操纵 16

十、易于装配 16

十一、低成本 16

§ 2-2 壳体的类型 18

§ 2-3 机架 19

一、机械机构的机架 19

二、电器及电子仪器的机架 20

参考文献 23

第三章 不可拆联接 24

§ 3-1 利用零件永久变形的联接 24

一、用舌形片联接金属薄板 24

二、用滚压法联接管子 25

三、压形联接 25

四、中心冲联接 25

五、卷边联接 26

六、铆接 26

§ 3-2 锡焊和铜焊联接 27

一、锡焊 28

二、铜焊 29

§ 3-3 气焊、电弧焊和电阻焊 30

一、气焊和电弧焊 30

二、电阻焊 30

§ 3-4 胶接 34

一、蛋白胶 34

二、天然树脂粘合剂 34

三、合成粘合剂 34

四、无机粘合剂 34

五、合成树脂粘合剂 34

§ 3-5 胶腻子联接 36

一、靠物理变化固化的胶腻子 36

二、靠化学变化粘接的胶腻子 36

三、胶腻子联接的原则 36

四、胶腻子联接的缺点 36

§ 3-6 镶铸和热嵌联接 36

§ 3-7 压接和超声波焊接 37

参考文献 37

第四章 可拆联接 39

§ 4-1 压配合联接	39	§ 4-4 卡口联接	65
一、圆柱摩擦联接	39	一、弹性摩擦保险锁紧联接	66
(一) 压配合过程的现象	39	二、楔形摩擦保险锁紧联接	66
(二) 影响压入力和滑移力值的因素	40	三、形面保险锁紧装置	68
(三) 圆柱摩擦联接的计算	41	参考文献	68
(四) 推荐的配合和过盈量	44	第五章 弹性元件	70
(五) 圆柱摩擦联接举例	45	§ 5-1 引言	70
二、成型截面的压配合联接	46	一、弹性元件的比率	70
(一) 联接原理	46	二、弹性元件储存的能量	70
(二) 成型截面摩擦联接的优点	46	三、弹性缺陷: 弹性后效, 松弛和弹性滞后	71
(三) 成型截面摩擦联接的强度计算	47	四、温度对材料弹性的影响	73
§ 4-2 销联接	47	五、弹性元件的分类	75
一、圆柱销	48	§ 5-2 螺旋弹簧	76
二、圆锥销	48	一、压缩弹簧	76
三、槽销	49	二、拉伸弹簧	76
四、弹性销	49	三、扭簧	77
五、螺纹管销	49	四、螺旋弹簧计算的一般原则	77
六、挤压钮销	50	五、压缩弹簧的计算	80
七、销联接的计算	50	六、拉弹簧的计算	82
八、设计提示	50	七、弹簧的尺寸	84
§ 4-3 螺纹联接	51	八、过拉伸的拉、压螺旋弹簧	84
一、螺纹的种类	51	九、螺旋扭簧	85
二、螺钉联接件的设计	51	十、扭簧尺寸的确定	87
三、直接螺钉联接	54	§ 5-3 平弹簧	87
四、间接螺钉联接	54	一、受弯曲的片弹簧	87
(一) 螺钉	54	二、片弹簧的计算	88
(二) 螺栓	56	三、触点弹簧及其装置	89
(三) 螺母	56	四、触点弹簧的强度计算	90
(四) 垫圈	57	五、仅受横向力的单片或位于同一平面的多片的简单片簧支承	97
五、螺钉联接的锁紧装置	57	六、末端承受弯矩的片弹簧悬挂支承	98
(一) 锁紧装置	58	七、十字弹簧支承	99
(二) 防止无关人员的拧松	60	八、片弹簧导轨	102
(三) 防止螺钉和螺帽的遗失	60	九、用作支承的扭簧	103
六、螺钉紧固件的材料	61	十、张丝	104
七、螺纹紧固件、销、铆钉的保护涂层	61	十一、张丝材料	108
八、螺纹紧固件的热处理	62	十二、膜片	109
九、螺钉和螺栓联接的通孔直径	62	十三、弹性支承和导轨的优点	111
十、螺钉和螺纹孔的位置公差	62	§ 5-4 螺线弹簧	111
(一) 两孔的位置公差	62	一、螺线弹簧的计算	111
(二) 多孔的位置公差	63	二、游丝	112
(三) 两孔标注尺寸的一般情况	63		
(四) 按圆周分布的孔的位置公差	64		

三、发条	117	§ 6-10 止推轴承 (盖板型)	193
四、弹簧的材料	128	§ 6-11 在无振动工作条件下低速微型机 械中普通轴承的磨损	195
§ 5-5 热双金属元件	129	§ 6-12 磁性支承	196
一、温度变化时, 热双金属片挠度的 计算	129	§ 6-13 水银支承	198
二、热双金属元件中的应力	134	§ 6-14 滑动轴承的润滑	199
三、电流加热控制的热双金属触点弹簧	137	§ 6-15 刀口支承	201
四、热双金属弹簧的材料	138	一、具有圆柱或平支承垫的刀口支承的 计算	201
§ 5-6 压力控制的弹性元件	139	二、刀口支承的摩擦转矩	203
一、压力控制的弹性元件的一般性能	139	三、刀口支承的设计举例	204
二、弹簧管	141	§ 6-16 带中间滚动体的滚动轴承	206
三、膜片和膜盒	143	一、滚动轴承的精度及间隙	206
四、波纹管	151	二、滚动轴承的摩擦	209
参考文献	153	三、高精度轴承的应用	211
第六章 支承	156	四、杯锥形微型及超微型滚动轴承	212
§ 6-1 绪言	156	五、线轨轴承	215
§ 6-2 机械型圆柱滑动支承	156	六、无保持架及内环的微型及超微型 向心止推滚珠轴承	217
一、轴颈转动的支承	156	参考文献	220
二、轴颈静止的支承	157	第七章 导轨	223
§ 6-3 钟表型圆柱滑动支承	158	§ 7-1 导轨正常工作的静态条件, 卡滞 (自锁)	223
一、夹板上的直孔轴承	158	§ 7-2 导轨精度, 制造误差对导轨工作 的影响	225
二、装配在夹板上的矿石轴衬	160	§ 7-3 滑动导轨	227
三、钟表型支承的摩擦阻力	162	一、圆柱型导轨	227
§ 6-4 塑料及金属粉末烧结轴衬	164	二、棱柱型导轨	227
§ 6-5 V型块支承	164	三、滑动导轨的摩擦阻力	228
§ 6-6 顶尖支承和圆锥支承	167	§ 7-4 滚动导轨	228
一、微型机械中的顶尖支承	167	一、滚柱导轨	228
二、用于精密仪器的圆锥支承	170	二、自由滚动元件导轨	230
§ 6-7 球形支承	171	§ 7-5 导轨的强度计算	232
§ 6-8 静压轴承	173	§ 7-6 导轨材料	233
一、止推轴承	173	参考文献	233
二、径向轴承	174	第八章 心轴、轴、联轴器和离合器	234
三、静压轴承的性能	175	§ 8-1 心轴和轴	234
§ 6-9 轴尖支承	177	§ 8-2 联轴器和离合器	234
一、力沿轴线作用情况下的轴尖支承	177	一、刚性联轴器	235
二、承受轴向力及少量径向力的轴尖 支承	180	二、弹性联轴器	239
三、由两个轴尖轴承所支承, 并承受 轴向载荷的轴	182	三、牙嵌离合器	241
四、力垂直作用于轴的轴尖支承	183	四、摩擦离合器	243
五、振动对轴尖轴承磨损的影响	192		
六、温度对轴尖支承的影响	192		

五、棘爪单向离合器	250
六、磁性离合器	251
参考文献	255
第九章 螺旋传动	257
§ 9-1 传动螺旋机构	258
§ 9-2 测量螺旋机构	258
§ 9-3 定位螺旋机构	260
§ 9-4 螺旋传动机构中轴向间隙的消除	260
§ 9-5 螺旋传动机构的锁紧	261
参考文献	261
第十章 齿轮传动	262
§ 10-1 齿轮传动概述	262
一、定速比齿轮传动	262
二、速比在一个周节中变化的齿轮传动	263
§ 10-2 圆柱齿轮传动的基础知识	263
一、平均速比和瞬时速比	263
二、定速比和变速比齿轮传动的啮合情况	264
三、齿轮传动的瞬时力矩	266
四、齿轮传动的瞬时效率	267
五、平均传动效率	269
六、节点前和节点后啮合中的摩擦	269
七、加工方法对齿轮设计的影响	270
八、完全互换对齿轮设计的影响	270
九、齿轮传动小型化问题	272
§ 10-3 定速比圆柱直齿轮传动	272
一、减少齿轮的齿数	272
二、渐开线齿轮传动中心距增大的问题	274
三、对渐开线齿形的其他要求, 微型机械中推荐使用的基准齿廓	275
四、渐开线齿轮的加工误差和运动精度	281
五、驱动齿轮	288
六、测量用齿轮传动	289
七、小侧隙齿轮传动	291
八、无侧隙齿轮传动	292
§ 10-4 变速比圆柱齿轮	294
一、渐开线齿轮在计时机构中的应用范围	294
二、计时齿轮传动应用的修正摆线齿轮	300

三、计时齿轮传动应用的变速比齿轮传动	303
四、定力矩齿轮	309
五、计时传动齿轮的制造	309
六、计数传动齿轮	310
§ 10-5 直齿圆柱齿轮的承载能力	313
§ 10-6 直齿轮齿廓尺寸的确定	315
§ 10-7 平行轴的非圆齿轮传动	316
§ 10-8 非平行轴的齿轮传动	316
§ 10-9 间歇运动齿轮	317
§ 10-10 周转轮系	320
参考文献	321
第十一章 摩擦传动	324
§ 11-1 定速比传动装置	324
§ 11-2 变速比传动装置	327
一、盘型传动中的滑动及速比	328
二、变速比摩擦传动装置中力和力矩的计算	331
三、接触面积中最大比压的计算	335
四、摩擦轮采用的材料	336
五、有关摩擦传动装置的其它数据	337
六、传送带式的摩擦传动机构	338
参考文献	339
第十二章 挠性连接传动	340
§ 12-1 弹性挠性连接传动装置	341
一、摩擦型挠性连接传动装置	342
二、挠性件传动的计算	343
三、固定型连接传动装置	344
§ 12-2 链传动	348
§ 12-3 齿形带	349
参考文献	351
第十三章 指示元件	352
§ 13-1 连续指示元件	352
一、刻度的工艺方法及其精度	352
二、读数误差	353
三、指示器	358
§ 13-2 数字显示器	360
§ 13-3 状态显示器	361
参考文献	362

第一章 绪 论

§ 1-1 概 述

多数机器的目的是用来产生动力（各种类型的发动机）和作功的（工艺设备，起重和运输设备，挖掘、筑路和农业机械等）。这些设备需要承担越来越复杂的工作。所以，就要靠一些仪器来保证它们能正常而经济地发挥功效。这些仪器或是用来控制动力装置、工作母机和加工设备；或是用来指示、测量、记录那些表征这些机器和设备主要功能的数据。

控制和测量仪器以及无线电通讯，无线电接收，实验室，医学及许多其它类型的设备，都不是直接产生动力或作功的。而这些装置是用于接收，转换，放大和传递信息的。它们不仅在概念上，而且在设计上形成了一个不同于普通机械的分支学科。其通常的名称即为本书的书名。

微型机械和精密仪器都有一些特殊的性能和要求，如重量轻，指示精度高，抗外界干扰（如温度变化和磁场干扰等）。这些不同一般的要求促使设计人员必须去分析一系列基本问题。要做到不管有无外界影响都能保证微型机械和精密仪器正常可靠的工作。

值得注意的是人们常将微型机械和精密仪器错误地混同一谈。顾名思义，微型机械应包括所有的小型机械，甚至超小型的机械，而不考虑它们是否制造的很精密。

精密这个词（形容词意），这里理解为“精密制造的”（特殊元件具有较高的制造精度），或“具有精确性能的”。一台“精密制造的”或具有“精确性能”的机械，可小可大，甚至是很大的。不进行具体分析，很难断定手表和汽轮机哪一个的性能更精确。

精密仪器这个术语表明此种设备的主要特点是性能精确。通常也指制造的精密。它们不用来传递力和功率，一般是测量和机械计算装置，明显的例子是光学仪器和机械计算器。它们可能很小，但也可能与一般机械结构中采用的尺寸相差不大。因此，微型机械和精密仪器的概念有相同之处。为了概念清楚，我们要研究微型机械和精密仪器与一般机械区分的特点。

§ 1-2 微型机械与精密仪器的特点

一、尺寸小和精度高

微型机械最重要和最基本的特点是其零件的尺寸较小，而其性能精度和尺寸精度上它不同于精密仪器。由于微型机械的零件尺寸较小，其加工的精度问题也就不同于一般机械制造遇到的问题。另外，零件的工艺要求和材料选择也是不同的。对于精密仪器来说，主要考虑保证仪器本身的精度。这一问题下面将分别讨论。

加工精度 加工精度可通过一般机械轴承的配合和微型机械轴承的配合来比较分析。

如一般机械轴承与直径为 50mm 的轴颈配合，其公差为中等等级的间隙配合（按ISO），

孔

$$50H9 = 50^{+0.002}_{-0.002}$$

轴

$$50e9 = 50^{-0.011}_{-0.011}$$

最大间隙 $C_{\max} = 0.174\text{mm}$

最小间隙 $C_{\min} = 0.050\text{mm}$

钟表宝石轴承与直径为 0.5mm 的轴颈相配合的尺寸和偏差 (ISO) 为

孔 $0.5\text{H}9 = 0.5^{+0.025}_0$

轴 $0.5\text{cd}9 = 0.5^{+0.034}_{-0.059}$

最大间隙 $C_{\max} = 0.084\text{mm}$

最小间隙 $C_{\min} = 0.034\text{mm}$

上述轴颈和孔的制造公差, 由于加工的工艺性和公差数值的减小, 将大大提高生产成本——不仅是加工轴颈和孔, 为了保证轴颈在轴承中的灵活性, 如钟表夹板的制造精度及它们的位置精度也必须提高。

直径 50mm 的轴颈和轴承, 当它们的尺寸为极限尺寸时, 其最大间隙为 0.174mm , 这个数值为其直径的 0.35% 。这样小的间隙在图纸上是看不出来的。另一方面, 如果钟表轴颈和轴承以 $100:1$ 的比例在图纸上绘制出与 50mm 相同的直径, 其最大间隙就是 8mm , 也就是其直径的 17% 。这个间隙是显而易见的。因此, 虽然钟表轴承加工的绝对精度比机械轴承几乎提高了两倍, 但其加工的相对精度却降低了 57 倍。在机器中, 一个轴承的间隙占轴颈直径的 17% , 对于工作性能来说是不可思议的。在微型机械中, 由于考虑到工艺性和经济效果, 这样的间隙是允许的, 但必须保证正确的性能和工作的可靠性。

微型机械设计中其它元件与一般机械中相应的元件之间亦存在这样的区别。因此可以看出, 微型机械中确定元件尺寸和公差比一般机械更为重要。这是由于微型机械零件加工的绝对精度通常比一般的要求更严格 (由于尺寸较小)。但随着实际尺寸的减小, 其加工的相对精度是一定要降低的。

另外, 对于不属于微型机械的精密仪器, 则不仅要求相对精度较高, 同时也要求绝对精度较高。

二、制造工艺对设计的影响

由于微型机械中的组件尺寸较小, 刚度较低, 零件在加工时可能产生变形。因此, 不宜全部采用切削加工。在这种情况下, 我们可以考虑采用其它工艺, 如冲压工艺, 以便直接获得零件设计的形状。

生产量对工艺和设计都有着十分重要的影响。有些结构复杂的微型机械, 由于采用了大量生产的工艺方法, 其制造成本可以大幅度地降低, 从而使这种产品得到广泛的应用。

因此, 大量生产所考虑的问题, 不仅对微型机械的零部件, 而且对其整机的设计都有决定性的影响。

零件制造的方法与一般机械制造中的方法有所不同。这不仅是由于批量生产和尺寸较小的原因, 另外, 零件的联接方法和装配的技术要求也各有差异。这经常是影响设计的重要因素。此外, 设计者对大量生产的工艺性比小量生产的工艺性要考虑更多的问题。

精密仪器也有大量生产的。大量生产的工艺对设计的要求与微型机械相同。但是, 通常精密仪器都比较昂贵, 产量较低, 这种情况下, 工艺要求对设计的影响就不大了, 而最重要的是保证性能和加工的精度。

三、材料问题对微型机械与精密仪器设计的影响

不仅因为尺寸小和采用的工艺方法与一般机械制造不同, 而且由于特殊的工作要求, 使

0530162

微型机械与精密仪器的设计者不得不选用一般机械中不用的、或者局限于非重要机械零件的材料。采用不同的材料是根据零件的形状和整机的要求来确定的。塑料的应用就是一例。

四、微型机械与精密仪器的强度问题

强度是影响零件尺寸的因素，但在微型机械和精密仪器中，通常由于载荷较小，很少考虑强度。然而，在设计零件时，强度问题却不可一概忽视。某些特定结构的元件，如发条和轴承、轴颈等，虽然作用力不大，但由于尺寸非常小，亦会产生很大的应力。

微型机械中，特别是精密仪器中的强度问题与机械设计中出现的问题有不同的特点。在机器设计中，确定零件尺寸的决定因素是应力，而在微型机械和精密仪器设计中，弹性变形则是非常重要的。因为非常小的载荷如果引起某种程度的变形，这个机构就不能保持精确的性能。因此，强度计算不能仅仅局限于计算应力，更应着重确定弹性变形。在微型机械和精密仪器中，在考虑强度的同时，如果组件的惯性对性能有影响，还应计算组件的冲击和震动。

过去有这样一种看法，认为多数微型机械和精密仪器多是由有经验的工程师设计的，而不需要进行任何计算，他们认为，就技术而言，强度的计算是不必要的。其实，这种看法是错误的。我们知道，人们过去对机械零件的计算也是一无所知的，机器是靠技工师傅的丰富经验制造出来的。但这并不意味着机械设计的计算是不必要的。人们可以期望将来会掌握有关微型机械和精密仪器强度计算方面完善的知识，有可能像对机械零件那样，得出计算强度和磨损的方法。

§ 1-3 微型机械与精密仪器的分类

由于应用于各工程领域中的微型机械和精密仪器的性能原理有较大的差异，故分类工作是件非常困难的事。

通常，它们可分为两大类：非测量仪器（装置）和测量仪器。

1. 非测量仪器（装置）可分为：〔18〕

（1）机械的 例如办公室用的打字机、计算机、油印机等机械，日用的器械如刮脸刀、理发器、各种医用器械、机械玩具和自动售货机等；

（2）光学的 例如眼镜、放大镜等日用仪器，某些医疗仪器如膀胱镜、胃镜、验光镜以及静物摄影机、放大机、幻灯机、望远镜等；

（3）高压电器的 例如转换开关、过流继电器。除其电气部分外，还包括先进的微型机械的结构部分；

（4）低压电器和电子的 例如无线电通讯设备，铁路讯号和交通灯控制装置，汽车、飞机仪表装置等。

2. 测量仪器 可分为：

（1）长度测量 属于此类的仪器有机械式的（千分表和测微仪），电子的（各种类型的显示仪器和测微仪），光学测量仪器（光学比较仪，测量显微镜，分析显微镜）以及测量表面光洁度的各种仪器（轮廓仪，表面分析仪）等；

（2）时间和速度的测量 属于此类的仪器有各种类型的钟表，天文钟，程序钟（Programming clock 用于控制机械和设备的工作），延时机构（如时间继电器的延时机构和照

相机的快门、炮弹引信等), 转速表, 计数器等;

(3) 光学观察和实验室测量 属于此类的仪器有经纬仪, 水平仪, 光学倾斜仪, 测角仪, 准直仪, 旋光计和瞄准器等;

(4) 流量测量 如环天平流量计, 浮子流量计, 航空里程表, 马赫表等;

(5) 压力测量 如各种类型的压力计和真空计等;

(6) 体积测量 如气表, 水表, 汽油表等;

(7) 质量测量 属于此类的有各种类型的天平: 如分析用的, 实验室用的, 一般的和特殊型的 (例如微量比重计);

(8) 温度测量仪器;

(9) 电工和电子测量 此类仪器除电的部分外, 通常还包括先进的机械部分;

(10) 其它物理量的测量 如频率计和加速度计, 各种地球物理、水文和气象仪器, 锅炉气体耗量分析器, 测量角度和角速度的陀螺仪, 雷达设备等。

上述所有仪器 (非测量用和测量用) 是根据设计中的主要工作原理 (如机械的、光学的或电的原理) 进行分类的。然而, 实际中所有的仪器都具有微型机械和精密仪器的机械结构。

§ 1-4 微型机械与精密仪器中应用的金属

一、一般要求

虽然制造微型机械用的材料不多, 但由于大量生产采用了机械化和自动化, 相对劳动成本降低了, 而材料成本就显得重要了。机械化和自动化生产对材料的工艺性和尺寸规格的一致性要求较高。我们不能采用价格便宜的劣质材料来降低生产的成本。在大量生产中采用劣质材料将会产生很大的影响, 它不仅破坏生产设备, 甚至可能造成全部生产过程停止。

另一方面, 在单件和小批生产中, 材料成本比劳动成本低。一般劳动成本占整个成本的大部分。应该注意的是在小批量微型机械和精密仪器生产中, 劳动成本主要是高级的和有经验的劳动, 其所占的成本比其它机械和装置的生产要大的多。这样, 对微型机械的批量生产和精密仪器的小批生产采用较贵的高质材料是合算的。

二、微型机械与精密仪器中常用的金属

(一) 钢

轧制碳钢^[5] 含碳量低和非常低的钢 (含碳低于0.2%) 用于强度要求不高的冷加工零件 (如用于辗压螺纹和压制钉头槽的螺钉, 铆钉)。这类钢也可以采用渗碳和氰化处理。另外, 由于它具有较低的剩余磁性, 亦可用于结构小型化和快速影响要求不高时的磁路系统的元件。

高碳钢^[5]。用于不进行热处理而要求强度较高的零件。例如, 当齿轮轮齿的精度和强度要求较高, 但由于热处理产生变形而不能进行热处理时, 则应采用55号钢来制造齿轮。但必须说明的是55号钢不容易加工, 加工时刀具磨损较加工低碳钢要快 (如比20号或30号钢, 尤其是比易切削钢)。如果对零件表面硬度要求较高时, 可以采用低碳钢, 但加工后要进行表面渗碳或氰化处理。

易切削钢 (低碳钢, 平均含碳量0.1%, 含磷量增高)。供应的材料多为直棒料, 它是经

过精密轧制、甚至表面经过压光和磨光的棒料。这种钢的切削性较好，切屑为脆性，易于机械加工，尤其适合在自动车床上加工。易切削钢棒料的直径应具有严格的公差。像一般用于精密加工中的瑞士螺纹车床，其上采用棒料的外径为加工固定的基准面，其旋转精度应在 $10\mu\text{m}$ 以下。易切削钢虽然含碳量较低，但质脆，不适用于一般冷加工的零件。在精密制造中易切削钢可用于制造轴，轴尖，螺钉和小齿轮等。

高碳银亮钢（含碳1%）（银钢）〔8〕用于轴尖，轴齿轮以及工作中受磨损而要求具有长期耐磨性的零件，这些零件采用易切削钢是达不到要求的。用高碳钢制造的零件，按照规范需要进行热处理来提高硬度。但是这会造成较大的变形。在英国标准规范中有这种钢的特殊型号〔9〕。用这种特殊型号的材料可以在瑞士机床上加工钟表和精密仪表零件。它是用油进行淬火，所以，在热处理过程中变形甚微。

碳钢板〔10〕，如辗压的钢板可用于制造壳体、支架和其它作用不关紧要的零件。这种材料虽然不贵，但壳体在喷漆之前必需涂腻和磨光，电镀之前必需磨光。这样一来，成本就提高了。因此，采用这种材料多数是不经济的。如果对产品的壳体有较高的外观要求，应采用经过精密压延的钢板和钢带。这不仅对弯架或压延零件要这样，对半成品的零件也应如此。非常薄的板料，其厚度的公差都是有规定的。质量一般的平板料和带料，虽然适合于各种不同的用途，但其厚度有较大的变化。厚度变化较大的钢板会影响和破坏精密辗压，或降低生产质量（破裂，起皱）。为此，在精密生产的工厂里有必要设立一个准备工段，把板材先进行辗平加工。公差较低的平板料，经过清理后进行精密压延可达到较高精度的标准。在自动车床上加工的棒料，也需要经过准备工序。这些在较大公差范围内提供的棒料可以进行分组，各组的公差范围较小，或另外按尺寸进行压延和磨光。

用于微型机械和精密仪器设计的钢板有：

薄钢板，其厚度不大于 0.5mm ；

中钢板，其厚度由 0.5mm 到 1.5mm ；

厚钢板，其厚度由 1.5mm 到 3mm 。

3mm 以上的钢板很少使用。

用于精密加工中的金属板料零件，一般是冷加工成型的。金属板料是一种刚度较低的结构材料。但是，如果巧妙地运用塑性加工的技术，把金属板料加工成一定截面结构的元件，则可以得到较大的刚度。同时，还能保持重量较轻的优点。

轧制合金钢〔5〕 铬和铬镍合金钢〔5〕是在各种低碳或高碳钢中加入百分之几的合金成分。低碳合金钢需要进行渗碳；高碳合金钢的合金成分提高了材料的耐磨硬度（韧性、硬度）。这种合金钢多用于微型机械和精密仪器，因为它有较高的强度和硬度，且在淬火时，这种合金有较低的临界冷却速度。因此容易整体都淬硬（一般在油中淬火）。合金钢在热处理时的变形比碳钢要小得多。这对于精密的小零件来说是非常重要的。但零件淬火后加工比较困难，而对尺寸较小、形状复杂的零件是不可能再进行加工的。

氮化钢（渗氮钢）〔5〕 渗氮后硬度较高，且提高了耐磨性。由于渗氮温度较低（低于居里点），氮化钢在热处理中的变形非常微小。因此很适合于精密零件的生产。

含铬在 $12\sim 14\%$ 之间的不锈钢，适于在潮湿和热带气候条件下工作而又要求表面有抗腐蚀性的零件。例如小齿轮或照相机快门的零件。但是，当采用不锈钢时，应该知道，加工不锈钢要比加工碳钢、尤其是比加工易切削钢要困难得多。另外，不锈钢并非永不生锈。不锈

钢的防锈性能与零件表面质量有一定的关系。因此, 不锈钢零件的表面必须精心进行磨光。这又会提高加工的成本, 特别是尺寸较小、形状复杂的零件更是如此。目前可采用质地较硬的无气隙覆盖层(如化学镀镍)来代替不锈钢的防锈性能。采用覆盖工艺的零件, 可以采用非防腐性的材料(如易切削钢)进行加工制做。

奥氏体不锈钢^[5]是一种抗酸性腐蚀的材料。波纹膜片和拉伸的零件常采用这种材料。

制造弹簧和弹性元件的钢丝、钢带和钢板等材料, 将在第五章中讨论。

特殊的电工铁合金和钢、软磁材料用于小型电气设备的磁路系统。当要求矫顽磁力很小时, 这些材料的含碳量应非常低(0.03~0.04%); 当要求交流铁损较小时, 则应采用硅钢。而坡莫合金则用于要求初始导磁率较高的元件。电工低碳钢特别适于冷加工, 因此也可用于制造加工过程中需要较大变形的精密零件。

(二) 有色金属

黄铜^[7] 高强度含铅黄铜^[1, 14]一般含有58%的铜和2%的铅, 或63%的铜和1.5%的铅。这种黄铜易于加工。由于切屑较脆, 故特别适于在自动车床上加工。用这种材料制做的弹性板材可以做精密机构的夹板(如齿轮传动的夹板)。因为铅黄铜是一种很好的轴承材料, 可以使轴颈直接在板孔中转动。也可以采用这种材料制做齿轮片。这种材料的齿轮在铣齿时, 轮齿边缘几乎不留毛刺。即使留下一点毛刺, 也容易在酸洗过程中除去。因为纤细的毛刺可被酸液溶解而齿面实际上不受损伤。但是, 这种铅黄铜不能用来制做弯曲件, 特别是冷拉件。由于材料的脆性使零件在冷加工中易产生裂纹。黄铜的板材都是经过热轧制成。热轧后常常产生起皮现象, 特别是含铜63%的黄铜。含铜58%的黄铜加工更困难些。

铜基63的黄铜^[2] 它是一种具有良好延展性的材料, 非常适于冷加工。其加工中施加的压力又可提高它的硬度。但它的硬度却比铅青铜低得多。弯制和冷拉的零件都是采用铜基63的黄铜制做的。这种材料加工时的切屑呈连续的带状, 并且在工件上能形成较大的塑性毛刺。由于材质硬度较低, 特别是由于产生毛刺, 故铜基63的黄铜不能用来制造机械齿轮, 更不能用来制做小模数和超小模数的齿轮。如果用砂布来除掉齿轮上的毛刺时, 毛刺反而被压贴在齿面上, 这样会造成齿轮传动时卡住。也不能采用酸洗法除毛刺, 因为酸能腐蚀齿轮的工作面。

铸造黄铜^[7] 主要用于制做机架和杆件。由于合金的熔点较高, 生产中极易损坏模具, 故使生产成本提高。含铜60%, 铅1.5%, 其余成分为锌的黄铜可以用来成型铸造。

青铜 用含锡7%的锡磷青铜^[3]生产的带料、弹性板料和线材做成的弹簧可以在腐蚀条件下使用。青铜可做测量仪表的游丝和膜片。由于锡磷青铜的弹性模量($E = 10\ 500\text{kgf/mm}^2$)比钢低得多, 而其弹性极限却较高, 所以锡磷青铜更适合制做要求变形, 而又不产生永久变形的弹性元件。

承受载荷较大的弹性元件, 其变形较大而要求不产生永久变形, 需要采用昂贵的含铍2%的铍青铜, 经过热处理制成。另外, 由于磷青铜和铍青铜有良好的导电性, 故可用它们来制做触点弹簧片和电测仪表中的游丝等导电元件。

铸造青铜(含铜85%, 锡5%, 铅5%, 锌5%)是一种较好的轴承合金, 可用来制造滑动件, 如轴承衬套、导轨等。

镍和镍合金 工业用纯镍^[16]质地较硬并耐腐蚀, 可用于制造轴尖、轴、齿轮和在强腐蚀条件下工作的轴齿轮(如在热水表中的轴齿轮)。但是, 镍的价格较贵, 质地较硬难于加工。

镍银〔4〕是一种含镍10~30%、含铜55~63%、其余成分为锌的合金。当镍的含量较低时，合金呈黄色。镍的含量较高时几乎呈白色。镍银是一种抗腐蚀、强度高和弹性模量较低的材料。用镍银生产的板料、带料或弹簧丝主要用于制造触点弹簧〔13〕，也可用在磨损和腐蚀环境中零件的覆盖层上。

康铜（含镍40%，铜60%）是一种电阻温度系数较低的合金材料。因此，多用来制造测量仪器中的精密电阻器。

镍铜丝（含镍20%，铜80%）的价格比较便宜，但有较高的电阻温度系数。因此，多用于制造精度要求不高的电阻器。

因瓦合金（含镍36%和少量其它元素，其余成分是铁）是一种热膨胀系数非常低的合金。其热膨胀系数可以忽略不计。这种材料可用来制造各种仪器中要求尺寸不受温度影响的元件，如精密摆杆，测量长度的精密标尺，热双金属片的从动层等。因瓦合金在时效过程中，其热膨胀系数也随之而变。在室温条件下这一变化非常缓慢，时间可长达数年之久。因此，在精密仪器中使用的因瓦合金是采用人工时效的。但人工时效的方法比较困难，使用的设备也很昂贵，因而成本较高。因瓦合金不易加工。在因瓦合金表面上钻孔，那将是耗费时间的乏味工作。由于因瓦合金的导热性差，钻头会因温度升高而体积膨大，造成卡钻和折损。为此，钻孔时钻头转速要慢些，操作要细心些。

埃林合金（Elinvar）（成分见表5-1）是弹性模量温度系数非常低的一种铁镍铬合金。它用来制造对温度变化不敏感的弹性测量元件。但是这种金属的弹性极限很低，对载荷较大的弹性元件应采用多种成分的镍合金制做（如制做游丝的尼瓦洛克斯合金，其成分见本书第五章§5-4，二段）。

铝和铝合金 经过退火处理的工业纯铝〔11〕，质地柔软并具有很好的延展性。利用冷加工可把铝和铝合金制成重量很轻的零件，如数字圆盘和鼓轮，屏蔽件，壳体，管材和指针等。铝和绝大多数铝合金都要经过人工表面氧化处理（电极法和化学法），使金属表面形成一层薄而坚硬的氧化物，以提高金属的耐磨性和耐腐蚀性，同时，还可以形成各种令人爽心悦目的颜色。

铸铝合金〔12〕 赋予铸铝合金良好铸造性能的主要成分是硅。在铸造工程中用的铸铝合金具有多种成分，其性质也各有差异。铸铝合金可用来制做壳体、机架、夹板、杠杆和其它各种元件。单件和小批量生产可用砂型铸造，大批量生产时可采用硬模铸造或压力铸造。由于铝有良好的可铸性，用压力铸造可以获得表面平滑、壁薄、造型结构复杂、质量较高的铸件。它可以将过去需要用几个由板料或机械加工的零件组成的构件，设计成一次浇铸成型的构件。因而可以大大的降低大规模生产的成本。有些铝合金的强度可以通过热处理来提高。

锻（熟）铝合金〔11〕 在精密工程中主要应用经过热处理的铝合金。这些材料的机械性能是在经过热处理、并在室温条件下放置一定时间后获得的（从几小时至几十小时，视合金的材料而定）。弯制件和压制件可以在热处理后立即加工成型。这样，加工后就不会变形。锻（熟）铝合金在温度0℃以下可以减慢硬化过程。用这种方法可以延长塑性加工的有效时间。这类合金中有些材料的强度和钢相差无几。如果为了减轻重量而采用铝合金，应该了解，其弹性模量为 $E = 0.75 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$ ，它相当于钢的三分之一。因此，一根铝或铝合金制成的杆件，在尺寸和载荷相同的条件下，承受弯曲时的挠度要比钢大三倍。

在考虑惯性力时，惯性力与质量成正比（钢的重度是 7.8 gf/cm^3 ，铝的重度为 2.8 gf/cm^3 ）。

cm^3), 如果尺寸不变, 使用铝和铝合金的材料时, 重量可以减轻三分之一左右。如零件的弯曲是受惯性力作用时, 以铝和铝合金代替钢, 在多数情况下并不能减小应变, 但却能把应力减少三分之一左右。在动载荷条件下, 如果微型机械和精密仪器中的应力较小, 但细小零件的变形对仪器性能有很大的影响时, 以铝代钢除增加生产费用外, 对设计并没有多少益处。所以, 铝和铝合金只能在必须减轻设计的总体重量时采用。由于铝合金和钢的横向变形系数几乎相等(约为0.3), 弹性模量 E 和剪切弹性模量 G 的关系对这些金属来说都是 $E \approx 2.6 G$ 。因此, 这种考虑也适于扭曲的情况。另一方面, 当应力是由于零件惯性较大而引起的时候, 采用铝合金较采用钢更为有利。因为铝合金的强度一般比钢强度的 $1/3$ 高。如果将低碳钢和经过热加工的锻(熟)铝合金进行比较, 后者的强度可能等于甚至超过前者。

铝和铝合金的应力集中效应比钢更敏感。为此, 由上述材料制成的动载零件, 设计者应保证在其断面变化处有较大的圆角和较圆滑的过渡连接。这种要求亦适用板材制成的零件, 但铝合金件的弯曲半径要比钢件大些, 特别是经过热加工的可锻铝合金件。

镁合金 在精密制造中, 可以采用铸造镁合金及板料、棒料、管材和压制的型材。镁合金比铝合金还要轻些(前者重度在 $1.8 \sim 1.9 \text{ kgf/cm}^3$), 但它的强度较低(屈服极限在 $5 \sim 12 \text{ kgf/cm}^2$ 之间, 根据合金不同而异)。其弹性模量稍高于铝合金弹性模量的一半。在动载情况下对铝合金的技术要求, 在很大的程度上也适用于镁合金的技术要求。镁合金的铸件可以象铝件一样复杂, 但铸件壁更薄。镁合金易受腐蚀, 所以, 镁合金的表面通常加覆盖层, 这已成为一条规定。机架、壳体和其它轻载元件, 特别是要求体轻的元件, 都用这类合金制造。

锌合金〔6〕 在精密制造中, 锌合金具有良好的可铸性, 可用于压模铸造。其铸造精度较高, 表面平滑, 能铸造出十分复杂的铸件, 成本又特别低廉。这种材料不仅便宜, 而且浇铸温度较低, 可以延长铸模的使用寿命并降低单位成本。

然而, 这种铸件的强度较低, 性脆, 在轻合金中还算较重的(如文献〔6〕所述B合金的重度为 6.7 gf/cm^3)。当要求工件的重量较轻时, 采用锌合金铸出薄壁工件, 可部分补偿材料重量大的缺欠。锌合金的缺点是抗腐蚀能力较差。因此, 用锌合金制造的零件, 表面必须进行覆盖处理。锌合金的体积随时间的推移而增大(膨胀), 这对精密制造来说是非常不利的。因为经过一段时间后, 锌合金的自然膨胀会引起零件在铸模中滞塞。最常用的合金是压铸锌合金(如文献6所述B合金的成分为铝4%, 铜1%, 镁0.04%, 其余成分为锌)。

用较强的材料如钢或黄铜制造的元件, 可以容易地插入模具中, 然后再在其周围浇铸锌合金。这样, 可以由浇铸直接获得具有接头孔、小轴、弹簧挡等复杂造型的零件。这种零件不需要任何加工即可进行组装, 故可使成本降低。

§ 1-5 塑 料

塑料广泛应用于微型机械和精密仪器制造。塑料分为热塑性塑料和热固性塑料两大类。

一、热塑性塑料

热塑性塑料加热到一定温度就会软化, 继续加热可以液化, 经过冷却又行固化。这种变化具有逆转的物理性能。热塑性塑料主要适用于组件的铸塑成型。铸塑成型可以达到较高的精度(小工件的误差不超过 1 mm 的百分之几)。铸塑成型可以把塑料压铸在金属体的周围(如小轴或具有接头孔的元件)。这样的组件可不需加工即可进行组装。但是, 当设计塑料零