

滚动轴承的分析方法

机械工业出版社

滚动轴承的分析方法

万长森 编著

机械工业出版社

本书比较全面系统地介绍滚动轴承计算的基本原理及其分析方法。内容包括滚动轴承的几何关系、应力与变形、运动学关系、弹性流体动力润滑、接触疲劳、额定静负荷、额定动负荷、寿命计算和寿命试验数据的处理、刚度、摩擦力矩以及滚动轴承的优化设计、计算机辅助设计等问题。既有基础的内容，也介绍近年来新发展的方法，还给出一些可供应用的计算机程序。

本书可供从事轴承设计、研究的科技人员参考，也可供高等院校师生参考。

滚动轴承的分析方法

万长森 编著

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $11^{1/2}$ · 插页 2 · 字数 297 千字

1987年3月北京第一版·1987年3月北京第一次印刷

印数 0,001—3,760 · 定价 5.20 元

*

统一书号：15033·6383

370884

前 言

滚动轴承是广泛应用的、重要的机械基础件。从本世纪初，随着汽车工业的发展，滚动轴承的设计和制造开始集中由专业化工厂进行，形成一项重要的基础工业。大量生产的结果，有可能提供精度高、价格低廉的滚动轴承，扩大了应用范围。四十年代以来，逐步发展了滚动轴承在纺织机械、机床、精密仪器、船舶、飞机等方面的应用。直至今日，更扩大应用到原子能、电子计算机、航天、机器人等领域。因而，如何使滚动轴承能够达到性能好、寿命长、可靠性高，是轴承设计者和广大用户共同关心的重要问题。为适应这一需要，本书介绍了作为轴承设计者和选用者所应掌握的滚动轴承计算的基本原理及其分析方法。

滚动轴承计算原理的基础内容是指轴承中的几何关系、负荷分布、应力与变形、运动学关系、额定静负荷、额定动负荷和寿命计算等。这些内容主要是运用材料力学和弹性力学的方法分析研究滚动轴承，其依据是赫兹（Hertz H.）的弹性接触理论和帕姆格林（Palmgren A.）的轴承额定动负荷理论。到五十年代为止，这部分内容已基本完整。本书中力求全面系统地阐述其原理，并给出供轴承设计和选型时采用的分析方法和表达式。第二、三、四、五、七、八、十、十三和十四章主要介绍这部分内容。

滚动轴承计算原理的新发展是指接触疲劳的机理、弹性流体动力润滑理论在轴承中的应用、滚动轴承的优化设计和计算机辅助设计等。主要是六十年代以来的研究成果。电子计算机的应用为这种发展提供了可能，可以建立较复杂的数学模型，预测滚动轴承的性能、寿命和可靠性，准确度显著提高。本书第六、九、十五至十七章主要介绍这部分内容。

本书是在参阅国内外有关资料，并总结了多年来在洛阳轴承研究所工作期间从事轴承设计理论研究的经验基础上编写而成。

综合叙述滚动轴承的计算原理和分析方法是初次尝试，可能会有不少缺点，取材未尽恰当，专用名词选用未尽贴切。欢迎读者批评指正。

著者

一九八五年三月

目 录

前 言

符号表

第一章 滚动轴承的类型	1
第一节 概述	1
第二节 球轴承	3
一、向心球轴承	3
二、双列向心球面球轴承	6
三、向心推力球轴承	6
四、分离型向心推力球轴承	7
五、双半内圈向心推力球轴承	7
六、推力向心球轴承	8
七、推力球轴承	9
八、直线运动球轴承	9
九、微型球轴承	10
十、特大型轴承	11
第三节 滚子轴承	12
一、向心短圆柱滚子轴承	12
二、双列向心球面滚子轴承	14
三、圆锥滚子轴承	14
四、滚针轴承	15
五、推力滚子轴承	16
六、滚动导板	17
第二章 滚动轴承的几何学关系	19
第一节 概述	19
第二节 球轴承	20
一、密合度	20
二、接触角	20
三、主曲率	21
四、游隙	23

五、游隙与接触角的关系	26
六、极限倾斜角	31
七、套圈挡边	32
八、保持架	33
第三节 滚子轴承	34
一、密合度	34
二、接触角	34
三、主曲率	35
四、游隙	36
五、短圆柱滚子的轮廓形状	42
第三章 接触应力和变形	44
第一节 概述	44
第二节 弹性接触的赫兹理论	45
一、基本假设	45
二、空间接触问题的赫兹理论	46
三、平面接触问题的基本公式	50
第三节 滚动轴承接触应力和变形	52
一、滚动轴承接触应力和变形公式	52
二、不同材料组合时的修正	55
三、COSDE计算机程序	57
第四节 接触表面下的应力分布	64
一、最大静态切应力	65
二、最大动态切应力	66
第五节 接触应力的影响因素	69
一、表面切向力	69
二、表面缺陷	70
第四章 滚动轴承中的负荷分布	72
第一节 概述	72
第二节 变形与负荷的关系	72
第三节 向心轴承中的负荷分布	74
一、径向游隙为零的情况	74
二、径向游隙不为零的情况	76

第四节	受轴向负荷的轴承	78
一、	单向推力轴承	78
二、	双向推力轴承	82
三、	向心推力球轴承	83
第五节	受径向和轴向联合负荷的轴承	86
一、	单列向心推力轴承	86
二、	双列向心推力轴承	88
三、	接触角变化的考虑	90
第六节	受径向、轴向和力矩联合负荷的轴承	92
第五章	滚动轴承的运动学关系	96
第一节	概述	96
第二节	简单的运动学关系	96
第三节	球轴承中的一般运动学关系	100
一、	坐标系的选取	100
二、	钢球的公转、自转和自旋	101
三、	钢球的陀螺运动	105
四、	套圈滚道控制的假定	107
五、	旋滚比	109
第六章	滚动轴承的弹性流体动力润滑	110
第一节	概述	110
第二节	弹性流体动力润滑理论	111
一、	弹性流体动力润滑理论的发展	111
二、	线接触状态的油膜厚度	118
三、	点接触状态的油膜厚度	120
四、	弹性流体动力润滑的摩擦力	123
五、	弹性流体动力润滑的测试方法	125
第三节	滚子轴承油膜厚度的计算	126
第四节	球轴承油膜厚度的计算	131
第五节	滚动轴承油膜厚度的估算方法	133
附 录	滚动轴承油膜厚度的计算机程序	135
第七章	接触疲劳	139
第一节	概述	139

第二节 接触疲劳的最大动态切应力理论	140
一、滚动轴承寿命的分布函数	140
二、额定滚动体负荷	144
三、指数的确定	146
第三节 接触疲劳破坏的工程模型	148
一、接触疲劳的多种扩展方式	148
二、表面下的裂纹扩展	149
三、在表面的裂纹扩展	151
四、指数的确定	153
第四节 接触疲劳的统计断裂理论	154
一、接触疲劳的破坏概率	154
二、帕里斯公式和随机微分方程	155
三、表面下切应力和其非线性拟合	156
四、接触疲劳破坏概率的计算	157
第五节 影响接触疲劳的因素	158
一、材料和冶炼方法	158
二、毛坯成形的纤维流线	160
三、热处理工艺方法	161
四、机械加工方法	162
第八章 滚动轴承的额定动负荷和当量动负荷	164
第一节 概述	164
一、接触疲劳剥落	164
二、磨损	164
三、塑性压痕	165
四、烧伤	165
五、润滑脂失效	166
第二节 滚动轴承的额定动负荷	166
一、额定滚动体负荷公式的简化	166
二、内圈和外圈的额定动负荷	167
三、轴承额定动负荷的计算公式	169
四、系数 f_0 的计算	170
第三节 滚动轴承的当量动负荷	176

一、滚动轴承的寿命计算公式	176
二、向心和向心推力轴承的当量动负荷	177
三、推力轴承的当量动负荷	179
四、轴承当量动负荷的计算	180
第四节 寿命计算公式的修正	186
第九章 寿命试验结果的统计处理方法	191
第一节 概述	191
第二节 韦布尔分布的参数估计方法	191
一、韦布尔分布的数学性质	191
二、参数估计的图解法	192
三、改进的最小二乘法	194
四、最佳线性不变估计法	196
五、最大似然估计法	196
第三节 可缩短试验周期的处理方法	199
一、分组筛选法	199
二、截尾试验法	201
三、最大似然估计法的应用	205
附 录	212
第十章 滚动轴承的额定静负荷	215
第一节 概述	215
第二节 滚动轴承中的塑性变形	216
第三节 滚动轴承的额定静负荷	217
一、现行的额定静负荷计算方法	217
二、新的额定静负荷计算方法	219
第四节 滚动轴承的当量静负荷	223
一、向心和向心推力球轴承的当量静负荷	223
二、向心和向心推力滚子轴承的当量静负荷	224
三、推力和推力向心轴承的当量静负荷	224
第十一章 滚动轴承的寿命计算方法及其发展	226
第一节 概述	226
第二节 滚动轴承的寿命计算	226
第三节 滚动轴承寿命计算方法的发展	233

一、考虑滚动体寿命的额定动负荷	233
二、高速轴承的寿命计算	235
三、套圈倾斜对寿命的影响	236
四、摆动轴承的寿命计算	238
五、寿命计算方法的修改动议	240
第四节 直线运动球轴承的寿命计算	241
一、额定动负荷	241
二、额定寿命计算	244
第五节 滚动螺旋的寿命计算	246
一、额定动负荷	246
二、额定寿命计算	246
第六节 滚动轴承磨损寿命的计算	247
一、许用磨损系数	247
二、磨损寿命计算	250
第十二章 滚动轴承润滑脂的寿命	251
第一节 概述	251
第二节 润滑脂寿命的计算方法	251
一、润滑脂的种类	252
二、润滑脂寿命的试验方法	252
三、润滑脂寿命的计算方法	255
第三节 润滑脂寿命的影响因素	258
第十三章 滚动轴承的使用性能——刚度	259
第一节 概述	259
第二节 滚动轴承的变形和刚度	260
第三节 滚动轴承的预紧	263
一、定位预紧	263
二、定压预紧	265
三、预紧负荷值的选取	266
四、径向预紧	268
第四节 球轴承的极限轴向负荷	268
第十四章 滚动轴承的使用性能——摩擦力矩	271
第一节 概述	271

第二节 滚动轴承摩擦力矩的产生机理	272
一、弹性滞后引起的纯滚动摩擦	272
二、差动滑动引起的摩擦	274
三、自旋滑动所引起的摩擦	274
四、滑动接触部位的摩擦	275
五、润滑剂的粘性摩擦	276
第三节 滚动轴承摩擦力矩的计算	277
一、近似计算	277
二、较准确的计算	278
第十五章 滚动轴承的优化设计	281
第一节 概述	281
第二节 优化设计数学方法的基本概念	282
一、优化设计问题的数学表达形式	282
二、无约束条件的优化方法	284
三、有约束条件的优化方法	285
第三节 滚动轴承优化设计的目标函数	287
一、要求疲劳寿命最长	287
二、要求磨损寿命最长	288
三、要求摩擦力矩最低	289
四、要求高速球轴承的旋滚比最小	289
五、要求额定静负荷最大	290
六、多目标函数的情况	290
第四节 优化方法在轴承设计中的应用	292
一、单列向心球轴承的优化设计	292
二、圆锥滚子轴承的优化设计	294
三、钢球直径和球数的确定	297
第十六章 高速球轴承的计算机辅助设计	299
第一节 概述	299
第二节 套圈滚道控制理论	300
一、变形的几何关系	301
二、力的分析	302
三、变形与负荷的关系	304

四、基本方程组和解法	305
第三节 考虑弹性流体动力润滑的计算理论	310
一、球与套圈滚道间切向摩擦力	310
二、润滑剂及保持架对钢球的作用力	314
三、基本方程组及其解法要点	315
四、一些简化的计算模型	319
第四节 计算模型的应用	320
一、典型的程序输入和输出	320
二、动力学设计分析简介	321
三、选用计算模型的说明	325
第十七章 高速滚子轴承的计算机辅助设计	328
第一节 概述	328
第二节 考虑弹性流体动力润滑的计算理论	329
一、滚子的运动状态	329
二、力的分析	331
三、变形的几何关系	333
四、基本方程组	334
五、简化的方程组	334
六、不同计算方法的比较	337
第三节 滚子轴承轴线相对倾斜的影响	338
一、变形的几何关系	338
二、变形与负荷的关系	340
三、力的分析	341
四、算例的结果	343
参考资料	345

第一章 滚动轴承的类型

第一节 概 述

滚动轴承是广泛应用的机械支承，它主要由滚动体支承轴，与机座作相对旋转、摆动或往复直线运动。与滑动轴承相比，滚动轴承中以滚动运动为基础，同时也存在着滑动运动的成分。滚动轴承一般由内圈、外圈、滚动体和保持架组成。特殊情况下，可以无内圈或外圈，而由相配的主机零件代替。内外圈和滚动体通常由 GCr 15 轴承钢制造，根据具体要求，可以选用电炉冶炼、真空脱气冶炼、电渣重熔、真空重熔等不同的材料冶炼方式。内外圈和滚动体的淬火硬度通常是 HRC 61~65。有耐腐蚀特殊要求的轴承以及大多数精密微型轴承，可使用 9Cr 18 马氏体不锈钢制造，淬火硬度达 HRC 58 以上。工作环境温度在 200~316℃ 之间的高温轴承，可使用 Cr4Mo4V 高速钢制造。有防磁性能要求时，可使用 QBe2 铍青铜制造，但承受负荷的能力很低。保持架材料应具备强度高、比重小、自润滑性好、耐磨性高等特性，常用的有低碳钢、奥氏体不锈钢、黄铜、铝合金、酚醛树脂、聚酰胺（尼龙）、聚甲醛、聚四氟乙烯等材料。

与滑动轴承相比，滚动轴承具有下列优点：

（1）摩擦力矩低，起动摩擦力矩略高于运动摩擦力矩，功率损耗小；

（2）负荷、转速和工作温度的适应范围宽，工况条件的少量变化对轴承的性能影响不大；

（3）润滑、维护保养容易，可以避免配备专用的润滑系统；

（4）大多数类型的轴承能同时承受径向和轴向负荷；

(5) 轴向长度小；

(6) 外形尺寸已国际标准化，互换性好，替换方便。

另一方面，滚动轴承尚有下列缺点：

(1) 大多数类型的轴承径向尺寸大；

(2) 在高速、重负荷条件下工作时，轴承寿命短；

(3) 轴承振动、噪声较大。

近二十年来，国内外注重轴承结构设计和制造工艺的研究，上述不足之处有相当大的改善。例如：迅速发展的带保持架滚柱轴承，径向尺寸相当小，许多场合可以取代滑动轴承；为适应电动机配套需要，开发和成批生产了低噪声和低振动滚动轴承。

两千多年以前，人们就发现，以圆木支承重物，拖曳起来轻快得多。这是早期对滚动运动的感性了解。但是，成立专业厂生产滚动轴承，还是从二十世纪初开始的，受着汽车工业的发展所推动。第二次世界大战以后，随着航空、宇航、原子能、电子计算机等工业的发展，对滚动轴承的性能、寿命和可靠性提出更高的要求。许多国家在公司或大学内陆续设置以滚动轴承为主要对象的研究所或试验室，在轴承结构设计、计算理论、试验方法和制造技术等方面取得许多重要进展。尽管滚动轴承外形似乎没有多大变化，但深入分析表明，由于现代新技术的推广应用，滚动轴承的性能、寿命和可靠性已有大幅度的提高。滚动轴承的设计方法也有根本的变革，电子计算机辅助设计，特别是人机对话的会话型设计应用于轴承工业，取得显著的成绩。在本书的第十五至十七章将叙述有关的分析方法。

滚动轴承的品种繁多，可以有多种分类方法。按所能承受的负荷方向，可分为：

(1) 向心轴承 主要承受径向负荷，即与轴承旋转轴线垂直方向作用的负荷。有的类型在承受径向负荷的同时，也能承受不大的轴向负荷，即沿轴承旋转轴线作用的负荷。向心轴承应用最广泛。

(2) 向心推力轴承 能同时承受径向负荷和轴向负荷，接

触角不超过 45° 。

(3) 推力向心轴承 主要承受轴向负荷,也可在承受轴向负荷的同时,承受不大的径向负荷,接触角大于 45° 。

(4) 推力轴承 仅能承受轴向负荷。

按滚动体的类型,可分为:

(1) 球轴承 滚动体是球,一般由钢制作,称为钢球。试验室研究中,为减少高速旋转时滚动体的离心力,曾试制空心钢球,将两半球焊接而成,但近期实用前景不大。

(2) 滚子轴承 滚动体是短圆柱滚子、圆锥滚子或滚针。少数类型中,采用空心圆柱或空心圆锥滚子,可改善应力分布,方便润滑,已在精密机床中取得实际应用。

球轴承和滚子轴承的性能比较列于表 1-1 中。滚子轴承一般可承受较重的负荷。在同一工况条件下轴承外形尺寸相同时,滚子轴承的寿命长得多。

本章叙述常用的滚动轴承类型及其主要特点,并注意介绍有发展前途的几种新结构。

表 1-1 球轴承和滚子轴承的性能比较

项 目	球 轴 承	滚子轴承
承受负荷	较 轻	较 重
转 速	可高速运转	用于稍低的转速
摩擦系数	较 小	稍 大
耐冲击性	较 小	较 大
寿 命	较 短	较 长

第二节 球 轴 承

一、向心球轴承

图 1-1 所示为典型的向心球轴承。这是最常用的一类滚动轴承,适用范围宽,生产批量最大。其主要特点:

(1) 主要承受径向负荷,也可承受少量轴向负荷。承受纯径向负荷时,接触角为零。若选取较大的径向游隙并承受轴向负

荷时，接触角加大，轴承的轴向负荷能力相应增加。

(2) 轴承摩擦系数小，适宜于高速运转。特别在有轴向负荷的高速运转场合，比推力轴承更合适。

(3) 轴承内部结构简单，与其他类型相比，易于达到较高的制造精度。

(4) 一般采用冲压浪形保持架，内径大于 200 mm 或高速运转的轴承，可用车制实体保持架。

(5) 轴承的装配方法如图 1-2 所示。内外圈相对偏心地配置，填入规定数量的钢球后，轻压内圈并推至与外圈同心的位置，等间距地分开钢球，再装入保持架。

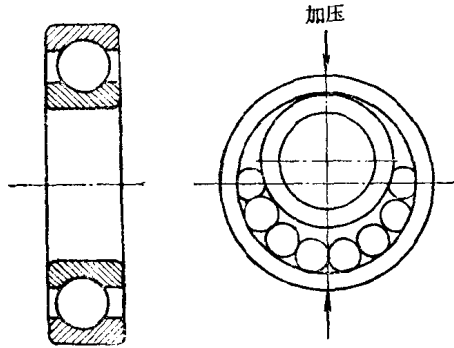


图1-1 向心球轴承

图1-2 轴承装配方法

所。内外圈相对偏心地配置，填入规定数量的钢球后，轻压内圈并推至与外圈同心的位置，等间距地分开钢球，再装入保持架。所能装填的钢球数目受填球角限制。

(6) 根据国家标准的规定，向心球轴承有不同的直径系列。相同内径尺寸时，不同直径系列轴承的相对尺寸关系如图 1-3 所示。

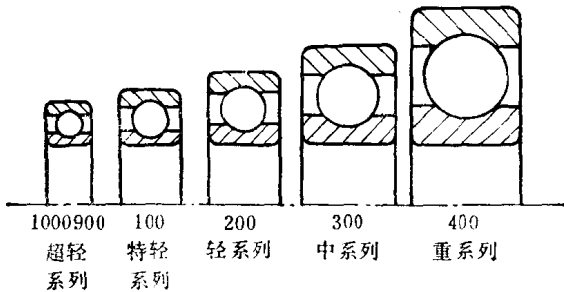


图1-3 不同系列轴承的相对尺寸