



GUNDONG ZHOUCHENG

GONGCHENGXUE

滚动轴承工程学

楊鴻銓等譯

P_0 : 当量静负荷。
 P_{0a} : 轴向当量静负荷。
 P_{0r} : 径向当量静负荷。
 p : 寿命公式的指数; 压力。
 p_{max} : 最大接触压力。
 Q : 滚动体负荷; 流量。
 Q_c : 在额定动负荷下的滚动体负荷。
 Q_{max} : 最大滚动体负荷。
 Q_{ψ} : 在角负荷 ψ 位置上的滚动体负荷。
 R : 径向摆动; 半径。
 r : 半径。
 注脚 r : 径向。
 r_e : 外圈滚道半径。
 r_i : 内圈滚道半径。
 S : 轴承耐疲劳概率; 可靠度。
 T : 轴承的装配高; 温度。
 t : 时间; 参数。
 U : 表面速度; 位置函数。
 u : 轴承旋转一周的交变接触数; 速度。
 V : 旋转系数; 体积; 滑动速度。
 v : 速度。
 W : 测量负荷。
 X : 径向系数。
 X_0 : 静径向系数。
 Y : 轴向系数。
 Y_a : 推力轴承的轴向系数。
 Y_0 : 静轴向系数。
 Z : 单列滚动体数。
 Z_0 : 产生动态最大剪应力的深度。
 α : 有效接触角; 角度; 粘度的压力系

数。
 α_e : 考虑了离心力时的外圈接触角。
 α_i : 考虑了离心力时的内圈接触角。
 α_0 : 原始接触角(考虑了配合的接触角)
 β : 滚子圆锥角的 $\frac{1}{2}$; 角度。
 γ : 补助量($=D_0 \cos \alpha / d_m$)。
 Δ : 有效游隙; 游隙。
 Δ_a : 轴向游隙。
 Δ_f : 残余游隙。
 Δ_r : 径向游隙。
 δ : 位移量。
 δ_a : 轴向位移量。
 δ_r : 径向位移。
 ε : 负荷率。
 τ : 降低系数。
 θ : 角度。
 λ : 降低系数。
 μ : 赫芝常数; 摩擦系数; 粘性系数。
 ν : 赫芝常数; 动粘性系数; 修正系数; 泊松比。
 ρ : 曲率; 密度。
 σ : 应力。
 τ : 剪应力; 赫芝辅助角。
 τ_0 : 最大动态剪应力。
 ψ : 滚动体的角度位置。
 ψ_0 : 负荷区角度的 $\frac{1}{2}$ 。
 ω : 角速度。

注: 其他符号的意义在本书各章中说明。

写在出版之前

本书是按苏州轴承情报会议精神，一机(1979)C66号文件指示，由洛阳轴承研究所安排虹山轴承厂翻译。在我厂总工程师張景瑞同志的组织下，有工程师楊鴻銓、沙璋、助理工程师汪燮民等同志共同翻译，洛阳轴承研究所李次公等校对，我厂副总工程师齐兴义审阅。由貴州省机械研究所和我厂联合出版。由于我們水平有限，再加上時間紧、任务重、在不到一年的時間內，大部分利用业余时间，完成了約40多万字的譯文，因而錯誤与不确切之处，肯定是有的，敬請讀者批評指正。

本书比較全面地介紹了滚动轴承的发展概况，材料、結構、动态性能，寿命負荷、潤滑和应用等各方面基础理論知識和科研成果，反映了現代滚动轴承的科学技术发展概貌。內容新穎，图文并茂，共有图表500多幅。主要供从事滚动轴承設計、制造、使用的工程师、技术員、工人参考，也可作为大专院校机械系的輔助参考教材，对搞經營管理的同志，可从中学习到滚动轴承的有关知識。

本书原計劃出版36K本上、下冊，由于出版条件改成16开本一冊，另外参考文献資料，因缺乏日文字母，只能用相应的汉字、英文、或譯成汉文代替，請讀者原諒。

本书系內部发行，它的出版，得到省机械研究所，洛阳轴承研究所情报科等单位大力协助。由張效增、秦祖余、張国兴、陈艳秋、陈春南等同志协助整理图、稿，乘此出版之时，表示深切的感謝。

譯者1980年10月15日

原 序

现存于伊拉克的尼尼韦大型浮雕画，据考证为公元650年时的作品。从画面来看，当时为搬运重物，已使用过“滚柱”，由此可知，人类运用滚柱的滚动作用来代替滑动运动，已有2500年以上的历史。

此外，最近从罗马附近的聂米湖打捞出—艘沉船，据考证为公元前50年时罗马皇帝喀利古拉的战船，从船上发现的推力轴承，类似于今天的滚动轴承。由此可见，在很早以前，以滚动轴承原理作为一项“技术”，已在实际中获得应用。

当时，所谓滚动作用，作为—门科学对象，为列奥纳多、达芬奇和莱布尼茨等天才人物提供过有趣的研究课题。

随着19世纪产业革命的到来，轴承开始在机械工厂生产。进入20世纪，出现了福特式的汽车大量生产方式。随继而来，作为支承各类机械旋转部位的重要精密机械元件——滚动轴承，也就有必要由专业化工厂进行大量生产。因而，美国于1889年成立了第泊桥制造公司，瑞典于1907年成立了SKF公司，德国于1909年创办了FAG公司，接着日本于1916年开始成立NSK日本精工公司。直到今天，对这些国家机械工业的发展，起到了重要的作用。

因此，现代轴承工业，作为—项基础工业，代表—个国家的工业水平，列为屈指可数的工业之一。若无轴承工业，就难以实现机械工业现代化，这是言不为过的。

进而在国际化时代的今天，日本滚动轴承工业的产量，仅次于美国而居世界第二位，其性能也得到了世界上先进工业国家的高度评价。每年约有年产量30%的轴承出口，成为国际商品。

可是，滚动轴承—方面存在着难以解决的问题，—方面仍在不断的发展。轴承外表虽无多大变化，但进一步深入来看，由于最新技术的研究成果，已扎实地应用于材料、热处理、设计、精密加工、精密测量等方面获得成功。使强韧而超精密的产品，连续不断地发生了变化。窄看起来，单个球和滚子无奇特之处，但对于这种很小的滚动体而言，要逐个地连续装配，是—项繁重而复杂的技术。

另—方面，使用滚动轴承的机械向高性能、高可靠性方向显著提高。这种结果，要求其精密机械元件——滚动轴承的性能和可靠性，也逐年提高。

为了适应这种严格要求，不仅要对轴承本身有关的技术，即轴承的硬磨损，而且要对与轴承使用方法有关的技术，即轴承的软磨损，要像车轮的两个轮子—样平行地研究发展，初步形成完整的轴承体系。目前已在实际中起到作用。

为此，滚动轴承是以经验为先导促进技术发展，与滑动轴承以理论为先导恰恰相反。因而，作为滚动轴承体系的技术基础是它的工程学，除理论外，还包含了很多应用和实际例子。再加上最近由于相关方法论的应用，精密实验技术的发展；电子计算机的运用等等，使滚动轴承工程学从经验逐渐进入科学的阶段。

本书作为“滚动轴承工程学”，把对于最新滚动轴承体系的硬磨损和软磨损为技术领域，以原有的技术为中心，作了叙述。有关滚动轴承这种书籍，都出自滚动轴承制造厂人员之手编写的。日本进行初次尝试，仅次于1945年SKF公司，1953年FAG公司，居第三位。

假如本书对滚动轴承相关工业的发展，稍有用处的话，就是份外之幸了。本书出版之际，得到东京株式会社养贤堂及川锐雄社长，川岛利之氏很大的帮助，深表感谢。

“滚动轴承工程学”编辑委员会

代表：上野正弦 1975年7月

符 号

符 号

意 义

A:	额定动负荷的计标常数; 径向摆动
a:	振幅; 接触椭圆长半轴; 偏心。
注脚a:	滚动体; 轴向。
B:	轴承宽度(圆锥轴承为内圈宽度); 额定动负荷的计标常数。
b:	振幅; 接触椭圆短半轴; 接触宽的 $\frac{1}{2}$; 圆锥滚子轴承外圈宽。
C:	额定动负荷。
C _a :	轴向额定动负荷。
C ₀ :	额定静负荷。
C _{0a} :	轴向额定静负荷。
c:	比热; 指数。
注脚c:	保持架。
D:	直径(主要指外径); 轴承外径。
D _a :	滚动体直径。
D _e :	外圈滚道直径。
D _i :	内圈滚道直径。
d:	直径(主要指内径); 轴承内径。
d _m :	滚动体的中心圆直径。
E:	纵向弹性系数; 第二种完全椭圆积分。
e:	韦布尔斜率; 用负荷比等求径向系数时所用的系数或指数。
注脚e:	外圈。
F:	轴承负荷; 力; 负荷; 累积破坏概率。
F _a :	轴向负荷; 轴向分力。
F _r :	径向负荷; 径向分力。
F _c :	离心力。
f:	振动数; 频率数; 求额定负荷时所用的系数。
注脚f:	止动挡边。
f _c :	额定动负荷计标系数。

f _{ca} :	轴向额定动负荷的计标系数。
G:	横截性系数; 流量。
g:	重力加速度。
H:	推力轴承的高度; 热量。
h:	油膜厚度; 指数。
I:	惯性力矩; 二次断面惯性力矩; 积分值。
i:	单个轴承内的滚动体列数。
注脚i:	内圈。
J _a :	轴向积分。
J _r :	径向积分。
J ₁ :	旋转圈的平均滚动体负荷积分。
J ₂ :	静止圈的平均滚动体负荷积分。
K:	第一种完全椭圆积分; 弹性常数。
k:	常数; 椭圆积分的全域参数。
L:	轴承寿命; 轴承的额定寿命(90%)。单位: 百万转。
L _m :	平均寿命。单位: 百万转。
L ₁₀ :	轴承的90%寿命。单位: 百万转。
L ₅₀ :	轴承的50%寿命。单位: 百万转。
l _a :	滚子的有效接触长度。
l _r :	滚子全长。
M:	力矩; 摩擦力矩。
m:	泊松数(泊松比的倒数); 质量。
注脚m:	平均值。
N:	总转数; 循环(交)变应力数。
n:	转速; 转数; 循环(交变)负荷数。
n _a :	滚动体的自转速度。
n _c :	滚动体或保持架的公转转速。
n _i :	内圈的转速。
P:	当量动负荷; 负荷。
P _a :	轴向当量动负荷。
P _r :	径向当量动负荷。

目 录

第一章 滚动轴承工程学概论... 楊鴻銓譯 1 李次公校

1.1 轴承工业的发展.....	1
1.2 滚动轴承与滑动轴承.....	2
1.3 滚动轴承工程学概论.....	2
1.3.1 摩擦与磨损.....	3
(1) 滚动摩擦.....	3
(2) 滚动轴承的摩擦.....	4
(3) 滚动轴承的磨损.....	4
1.3.2 润滑剂与润滑方法.....	5
(1) 润滑油.....	5
(2) 润滑脂.....	6
(3) 润滑方法.....	6
1.3.3 弹性与运动.....	7
(1) 滚动轴承的静力学.....	7
(2) 滚动轴承的动力学.....	8
1.3.4 寿命与额定负荷.....	9
(1) 滚动轴承的寿命.....	9
(2) 滚动轴承的额定负荷.....	10
1.3.5 音响与振动.....	12
(1) 滚动轴承的音响.....	12
(2) 滚动轴承的振动.....	12
参考文献.....	13

第二章 滚动轴承的类型... 楊鴻銓譯 17 李次公校

2.1 类型.....	17
2.1.1 分类.....	17
2.1.2 各类轴承的特征与用途.....	18
(1) 向心球轴承.....	18
(2) 磁电机轴承.....	18
(3) 向心推力球轴承.....	19
(4) 球面(自动调心)球轴承.....	19
(5) 双列向心推力球轴承.....	20
(6) 圆柱滚子轴承.....	20
(7) 圆锥滚子轴承.....	21

(8) 球面(自动调心)滚子轴承.....	22
(9) 滚针轴承.....	23
(10) 推力球轴承.....	23
(11) 推力圆柱滚子轴承.....	24
(12) 推力圆锥滚子轴承.....	24
(13) 推力球面(自动调心)滚子 轴承.....	25

2.2 轴承精度及其测量方法..... 25

2.2.1 主要尺寸精度及其测量.....	25
(1) 轴承内径.....	26
(2) 锥孔轴承的内径和锥孔.....	27
(3) 轴承外径.....	28
(4) 内、外圈宽度和端面平行 差.....	29
(5) 装配高.....	30
(6) 倒角尺寸.....	30
2.2.2 旋转精度及其测量方法.....	30
(1) 径向摆动.....	31
(2) 内圈端面侧摆.....	33
(3) 外径对基准端面的不垂直 度.....	33
(4) 轴向摆动.....	34
(5) 径向摆动和轴向摆动的反 复精度.....	37

2.2.3 游隙的测量..... 38

(1) 向心球轴承的径向游隙.....	38
(2) 圆柱滚子轴承的径向游隙.....	42
(3) 球面(自动调心)滚子轴 承 的径向游隙.....	42

参考文献..... 42

第三章 滚动轴承材料... 楊鴻銓譯 43 李次公校

3.1 滚动轴承材料要求的特性.....	43
3.2 套圈和滚动体材料.....	43

3.2.1 完全硬化钢	44
(1) 化学成份	44
(2) 非金属夹杂物	46
(3) 基体强度	47
(4) 残余奥氏体	48
(5) 碳化物的含量及其分佈	48
(6) 残余应力	48
(7) 硬度	48
(8) 加工	49
3.2.2 表面硬化钢	49
(1) 化学成份	49
(2) 硬化层设计	50
(3) 残余奥氏体	51
(4) 残余应力	51
(5) 加工	51
3.2.3 高合金材料	51
(1) 耐腐蚀轴承钢	51
(2) 高温用轴承材料	52
(3) 高温耐腐蚀轴承材料	54
(4) 低温轴承材料	54
3.3 保持架材料	55
3.3.1 铁合金材料	55
3.3.2 非铁合金材料	55
3.3.3 非金属材料	56
3.4 其他另件材料	57
参考文献	58

第四章 滚动轴承的特性(一) 沙 璋译 楊鴻銓校 59

4.1 滚动轴承的刚性	59
4.1.1 滚动接触处变形	59
(1) 点接触时	59
(2) 线接触时	61
4.1.2 球轴承的刚性	63
(1) 承受径向负荷时	63
(2) 承受轴向负荷时	64
(3) 承受力矩和一般负荷时	65
4.1.3 圆柱滚子轴承的刚性	66
4.1.4 圆锥滚子轴承的刚性	68
(1) 承受轴向负荷时	68
(2) 承受一般负荷时	68

4.1.5 滚动轴承支承的轴系刚性	70
(1) 轴承的力矩刚性	70
(2) 轴承间距和轴系的刚性	71
4.2 滚动轴承的运动	71
4.2.1 滚动体的自转、公转及滑动率	72
4.2.2 圆柱滚子轴承的滚子运动	73
(1) 滚子的公转、自转和倾斜	73
(2) 对滚子滑动的理论解释	74
(3) 作用到滚子上的切向力	76
4.2.3 球轴承中球的运动	78
(1) 球的运动	78
(2) 向心推力球轴承球的运动	78
4.3 摩擦与温升	83
4.3.1 轴承的摩擦	83
(1) 球轴承的负荷项	84
(2) 滚子轴承的负荷项	86
(3) 速度项	87
(4) 轴承的摩擦特性	88
4.3.2 轴承的温升	88
(1) 摩擦和温升	88
(2) 润滑方法与温升	89
(3) 轴承座形状	90
(4) $d_m n$ 值与温升	91

第四章 滚动轴承的特性(二) 楊鴻銓译 成 剛校 93

4.4 滚动轴承的振动与音响	93
4.4.1 滚动轴承的振动	93
(1) 滚动轴承振动的分类	93
(2) 与轴承弹性有关的振动	93
(3) 与轴承制造有关的振动	96
4.4.2 滚动轴承的音响	98
(1) 滚动轴承音响的分类	98
(2) 轴承的声音	98
(3) 轴承装于机组中发生的声音	103
4.4.3 滚动轴承的振动与音响的关系	103
4.5 弹性流体润滑理论的应用	104
4.5.1 滚子的公转与表面速度	104

4.5.2	公转(保持架)速度计标时的假定条件	105
4.5.3	作用于滚子的力和运动方程式	106
4.5.4	公式的简化	108
4.5.5	解法	109
附录		111
参考文献		112
第五章 滚动轴承的疲劳寿命和额定负荷		
	荷	楊鴻銓譯 李次公校 119
5.1	疲劳寿命	119
5.1.1	滚动轴承的损坏与寿命	119
5.1.2	寿命的数据统计处理	119
(1)	寿命的离散性	119
(2)	寿命的分布	120
(3)	寿命值的推断与评定	121
5.1.3	滚动疲劳机理	122
(1)	最大静态剪应力理论	122
(2)	最大动态剪应力理论	123
(3)	切向力的影响	123
(4)	其他理论	124
5.1.4	影响滚动疲劳的各种因素	125
(1)	与轴承硬磨损有关的因素	125
(2)	与轴承软磨损有关的因素	127
5.2	寿命与额定负荷	130
5.2.1	寿命计标方法的变迁	130
5.2.2	LUNDBERG-PALMGREN 理论	130
5.2.3	JIS的寿命计标方法	133
5.2.4	寿命计标方法的发展	134
(1)	负荷指数	134
(2)	最小寿命	134
(3)	高速旋转	134
(4)	圆锥滚子轴承的寿命计标新方法	135
(5)	考虑滚动体寿命的额定负荷	135
5.2.5	关于寿命计标式的最近方案	137
5.3	当量负荷	138

5.3.1	当量动负荷理论	138
(1)	当量径向动负荷	138
(2)	当量轴向动负荷	139
5.3.2	JIS的当量动负荷计标方法	139
5.3.3	负荷变动的当量动负荷	140
5.4	额定静负荷	40
5.4.1	与永久变形(塑性变形)量有关的公式	140
(1)	PALMGREN公式	140
(2)	JONES公式	141
(3)	ESCHMANN 公式	141
(4)	HARRIS公式	141
5.4.2	JIS的额定静负荷与当量静负荷	141
参考文献		142
第六章 滚动轴承的润滑		
		楊鴻銓譯 沙瑋校 145
6.1	滚动轴承的润滑方法	145
6.1.1	脂润滑与油润滑的利弊	146
6.1.2	密封装置	146
(1)	非接触密封	147
(2)	接触密封	147
6.1.3	脂润滑方法	148
(1)	密封圈和防尘盖轴承的应用	148
(2)	润滑脂更换基准	149
(3)	无特殊补脂装置	150
(4)	具有特殊补脂装置	150
6.1.4	油润滑法	151
(1)	油浴润滑法	151
(2)	飞溅给油润滑	151
(3)	循环给油润滑	151
(4)	滴油润滑	152
(5)	喷射润滑	152
(6)	喷雾润滑	152
6.2	滚动轴承的润滑剂	153
6.2.1	滚动轴承的润滑剂	153
6.2.2	润滑油	153
6.2.3	润滑脂	154

(1) 润滑脂的种类.....	154	轴承.....	174
(2) 润滑脂的结构.....	155	(4) 成对双联向心推力球轴承.....	174
(3) 润滑脂的流动及其在滚动轴承内的动态.....	155	7.2.2 固定端轴承.....	175
(4) 润滑脂的选定.....	155	(1) NUP 型向心圆柱滚子轴承.....	175
6.2.4 在脂润滑中存在的各种问题.....	156	(2) 向心球轴承.....	175
(1) 摩擦力矩和温升.....	156	(3) 带拆卸套的双列球面(自动调心)滚子轴承.....	175
(2) 润滑脂的泄漏.....	157	(4) 成对双联向心推力球轴承.....	175
(3) 脂润滑轴承的音响.....	158	(5) 双向推力球轴承.....	175
(4) 润滑脂的防锈性.....	159	7.2.3 半固定轴承.....	175
(5) 润滑脂的混合适应性.....	159	(1) 磁电机轴承.....	175
(6) 摩擦腐蚀.....	160	(2) NJ 型圆柱滚子轴承.....	175
6.2.5 润滑剂的恶化.....	160	(3) 单向推力球轴承.....	175
6.2.6 润滑脂的寿命.....	160	7.2.4 轴承的配置和安装方法.....	176
(1) 与润滑脂寿命有关的因素.....	160	(1) 中型电动机轴承.....	176
(2) 润滑脂的寿命的试验.....	161	(2) 蜗杆轴的固定端轴承.....	176
(3) 润滑脂的寿命计标公式、图表.....	163	(3) 汽车差动机构小齿轮轴承.....	176
(4) 润滑脂寿命的离散性.....	164	(4) 高速车床主轴.....	176
6.2.7 润滑剂的进展.....	165	(5) 其它各种安装结构.....	177
6.2.8 固体润滑剂.....	166	7.3 予紧.....	178
参考文献.....	166	7.3.1 予紧的目的.....	178
第七章 滚动轴承的应用.....汪燮民译 杨鸿銓校	169	7.3.2 予紧的方法与特点.....	179
7.1 配合与游隙.....	169	7.3.3 加于轴承的负荷和位移.....	179
7.1.1 轴承的配合.....	169	7.3.4 予紧与刚性.....	180
(1) 负荷性质.....	169	(1) 定位予紧时.....	181
(2) 负荷的大小和温度条件.....	170	(2) 定压予紧时.....	181
7.1.2 轴承游隙.....	171	7.3.5 予紧量.....	181
(1) 因配合引起的游隙减小.....	171	7.3.6 控制予紧的方法.....	182
(2) 因内、外圈温度差引起的游隙减小.....	172	(1) 测定轴承起动摩擦力矩来控制予紧的方法.....	182
(3) 运转时最佳有效游隙值.....	172	(2) 测定弹簧变形量来控制予紧的方法.....	182
(4) 轴承游隙的选择方法.....	173	(3) 测定轴承轴向位移量来控制予紧的方法.....	182
7.2 类型与配置.....	174	(4) 测定螺帽紧固扭矩来控制予紧的方法.....	182
7.2.1 自由端轴承.....	174	7.3.7 轴向负荷与起动摩擦力矩.....	182
(1) NU 型圆柱滚子轴承.....	174	(1) 圆锥滚子轴承.....	182
(2) 向心球轴承.....	174	(2) 球轴承.....	182
(3) 双列球面(自动调心)滚子		7.3.8 螺帽的紧固扭矩和紧固力.....	184

7.4 安装和拆卸	184
7.4.1 轴承装拆方面的注意事项	184
(1) 保持轴承及其周围环境的 清净	184
(2) 实现仔细的装拆	184
(3) 使用合适的装拆工具	184
(4) 由精通轴承者操作	184
(5) 防止轴承的锈蚀	184
7.4.2 安装操作	184
(1) 圆柱孔轴承的安装	185
(2) 内孔带锥度的轴承安装	186
7.4.3 拆卸操作	187
7.4.4 压装力和拔卸力	188
参考文献	190
第八章 滚动轴承的损坏	191
杨鴻銓譯 沙 瑋校	
8.1 磨损和烧伤	191
8.1.1 轴承材料的磨损特性	191
8.1.2 滚动表面的滑动	193
(1) 点接触处的滑移	193
(2) 线接触滚动	194
(3) 滚动轴承的微量滑动	195
8.1.3 轴承的烧伤	196
8.1.4 轴承的磨损	197
8.2 蠕动和磨蚀	198
8.2.1 蠕动	198
8.2.2 磨蚀	201
8.3 安装误差	202
8.3.1 球轴承的安装误差和寿命	202
(1) 向心球轴承	203
(2) 推力球轴承	204
8.3.2 滚子轴承的安装误差与寿 命	205
8.4 滚动轴承的损坏原因及防止措 施	207
8.4.1 异物的侵入	207
(1) 磨损	207
(2) 压痕	208
(3) 条痕	208
8.4.2 锈蚀	208

8.4.3 润滑不良	209
8.4.4 内、外圈的倾斜	209
8.4.5 负荷过大	210
8.4.6 保持架的损坏	210
8.4.7 滚动面的装配伤痕	212
8.4.8 轴承座的刚性不均	212
8.4.9 配合不当	213
8.4.10 振纹	213
8.4.11 表面变形	213
8.4.12 电蚀	213
8.4.13 热裂纹	213
8.4.14 崩缺	214
参考文献	214

第九章 滚动轴承的应用例子

江燮民譯(4、6、节)	
楊鴻銓譯(1、2、3、5、7、8、9、10节)	
李次公 沙 瑋 張效曾等校	216
9.1 汽车的前轮、后轮	216
9.1.1 非驱动轮	216
9.1.2 驱动轮	217
(1) 独立悬挂	217
(2) 车轴悬挂	218
9.2 汽车的终级减速箱	220
9.2.1 单臂支承	220
9.2.2 双臂支承	223
9.3 齿轮变速箱	223
9.3.1 汽车的齿轮变速箱	223
9.3.2 建筑机械和农业机械中的 变速装置	225
(1) 行星齿轮机构	225
(2) 滑动齿合式变速机	226
9.4 拖拉机动力传动机构	226
9.4.1 拖拉机动力传动机构	226
9.4.2 动力传动机构用轴承	227
9.4.3 其它结构中的轴承	228
(1) 直接传动变速箱	228
(2) 横轴	229
(3) 终减速机构	229
(4) 起动轮轴	230
9.5 铁路车辆车轴轴承	230

9.5.1 圆锥滚子轴承.....	231	9.8.1 机床主轴轴承的特性要求...	244
9.5.2 球面滚子轴承.....	233	(1) 切削时主轴的振动.....	244
9.5.3 圆柱滚子轴承.....	233	(2) 轴承的发热.....	245
(1) 前盖端一侧安装球轴承.....	234	9.8.2 主轴用滚动轴承的类型和精度.....	246
(2) 有挡边的圆柱滚子轴承类型.....	234	9.8.3 主轴滚动轴承的特点和应用例子.....	246
9.6 电动机.....	235	(1) 圆锥滚子轴承.....	246
9.6.1 主要用途与轴承的种类.....	235	(2) 双列圆柱滚子轴承.....	247
9.6.2 其它应用实例.....	236	(3) 向心推力球轴承.....	248
(1) 家用电器.....	236	(4) 推力向心球轴承.....	249
(2) 汽车发电机.....	236	9.9 喷气发动机(主轴承).....	249
(3) 小型电机.....	237	9.9.1 高速轴承的类型.....	250
(4) 标准电机.....	237	9.9.2 轴承材料.....	250
(5) 竖式电动机.....	237	9.9.3 润滑.....	251
(6) 电动工具.....	238	9.9.4 打滑.....	252
(7) 高频电机.....	238	9.9.5 轴承阻尼.....	253
9.6.3 应用中的几个问题.....	239	9.9.6 轴承可靠性的考虑.....	254
9.7 控制仪表.....	240	9.10 轧机轧辊轴承.....	254
9.7.1 控制仪表用轴承.....	240	9.10.1 轧辊轴承的有关问题.....	254
9.7.2 轴承材料.....	240	9.10.2 四列圆锥滚子轴承.....	256
9.7.3 主要应用例子.....	240	9.10.3 四列圆柱滚子轴承.....	257
(1) 同步电机.....	240	(1) 线材轧机用四列圆柱滚子轴承.....	258
(2) 伺服马达.....	241	(2) 支承轧辊用四列圆柱滚子轴承.....	258
(3) 陀螺仪.....	241	9.10.4 森吉米尔轧机支承辊轴承.....	258
9.7.4 控制仪表用轴承的几点问题.....	242	9.10.5 轧辊辊颈轴承的润滑.....	259
(1) 轴承的配合.....	242	参考文献.....	259
(2) 轴承游隙.....	242	附表: 点接触常数中的HERTZ公式.....	261
(3) 轴承摩擦力矩.....	243		
(4) 润滑.....	243		
9.8 机床主轴.....	244		

第一章 滚动轴承工程学概论

1.1 轴承工业的发展

社会对轴承工业的需要，可以追溯到产业革命，而产业革命又可划分为如下四个阶段：

第一阶段（1780～1820年）所谓的产业革命，是以纺织机械和蒸汽机的发明及其两者的结合。并借助焦炭和蒸汽机研制的新的搅炼钢法，可能生产出优质而廉价的钢铁，并以此为基础的机械工业诞生时代。

第二阶段（1840～1870年）是铁路和电讯的普及时代。以英国为中心的各种新技术传播到欧洲大陆和美国，为产业革命的成熟时期。

第三阶段（1890～1920年）是电力、汽车和化学工业的时代，它的特点是：由于发电机、电动机、白炽灯泡的发明，以及中央发电所方式的确定，使电力使用获得普及；由于内燃机的研制，导致汽车工业的诞生和大量生产方式的确定；以茜素系染料和氨之类合成化学工业为基础的化学工业得到了发展。

第四阶段是1940年以来的石油化学、电子学、计算机，以及作为新能源的原子能利用时代。其特点是：成为这些工业的基础技术，正在有计划、有组织地继续开展研究。

从产业革命的第一阶段，轴承作为新发明机械旋转部件的支承元件发挥了作用。而且，从进入产业革命的第三阶段起，这些机械已能正规地大量生产。同时，轴承也随着专业制造厂的出现，把以往在各个机械制造厂作为机械另件之一，单件制造转化为专业生产。这是因为轴承不同于其他另件，它本身就具备了大量生产和使用的先决条件，即国际互换性和标准化。

迄今为止，各国专业制造厂的成立时期，几乎都集中在1890～1920年的产业革命第三阶段，同时，上述时期是继1885年汽油机汽车发明后，随着福特体制的建立，开始了小轿车的大量生产。到1910年轴承的生产方式与之一致。也就是说：滚动轴承的发展依赖于小轿车消费机械的需要量。要比产业机械的需要量强得多，但同时也作为工业在成长起来了。

首先在产业革命的第一和第二阶段中，各种机械用的轴承，几乎都是“滑动轴承”，它给动力、生产、与运输带来了革新手段。即这些机械的产量很小时，轴承的设计、制造、装配和调正的所有作业，都是设计者和制造者的工作。但是由于像汽车那样流水作业方式，生产量很大，所以轴承设计、甚至制造就有必要在专业制造厂进行生产。因而，当时把军工业中使机械另件有互换性的设计思想应用于滚动轴承。并将精密加工法和测量方法引进到轴承生产。使性能相同的轴承尺寸和负荷容量实现标准化，这种结果，与在机械制造厂单件生产相比，有可能提供廉价而高精度的轴承。

即使从轴承用户方面来看，滚动轴承也具有如下特点：（1）国际标准化产品；（2）在国际上具有互换性；（3）轴承设计简单；（4）孔和轴加工容易；（5）装配后不需调正；（6）能使用脂润滑，所以轴承结构和维护保养简单等等。但与滑动轴承相比，尚有：（1）外径大；（2）刚性小；（3）音响、振动大等缺点，应予以克服。

另外，从轴承制造角度来看，有如下优点：（1）是标准化产品；（2）可大量生产；

(3) 可用专用机床采用精密加工法, 生产高精度轴承; (4) 生产成本低等等。

由于上述理由, 在大量生产的机械中, 扩大了滚动轴承的应用范围。

1.2 滚动轴承与滑动轴承

在机械上的轴承, 使用滚动轴承还是使用滑动轴承, 这是一个尚未解决的问题。如作为工业产品, 即商品轴承的流通来说, 不能仅从工程学上的优越性能这一观点来片面理解, 而要考虑它的经济性和使用方便性。即如已经指出的那样⁽¹⁾, 在滚动轴承性能中, 如高速旋转、允许负荷、寿命、大小、刚性、磨擦和音响等等, 无论哪一项, 从设计、制造、安装和调整都不如滑动轴承理想。可是, 尽管如此, 因滚动轴承具有使用方便和经济性这两方面的根本的技术特点, 所以滚动轴承仍能作为工业不断地发展。也就是说: 滑动轴承虽在工程学的优越性能上胜过滚动轴承, 但要成为工业体系, 尚存在如下问题, 对于机械制造厂来说: 要对滑动轴承进行设计、加工和调正, 以及考虑给油和密封装置等; 而对于用户来说: 包括给油和密封装置在内的轴承部件的成本, 标准化、互换性, 维护保养等等。无论其中任一项, 就使用方便和经济性这一观点来看, 都不及滚动轴承。因此, 作为轴承体系来说, 滚动轴承对工业的发展是有利的。

然而, 一种产品的工业化, 需要考虑两个方面, 首先是机械设计者需要得到最佳的旋转性能, 从理论设计方法来原因, 就需选用滑动轴承。如果是动压轴承, 就要对精密加工、给油方式和密封等, 作为轴承辅机进行试运转。而对静压轴承, 就要对油压泵、控制装置和密封装置等轴承辅机进行试运转。通过这些准备之后, 进行机械性能的设计, 如果确信能达到预期效果, 则进入生产设计。这时就要考虑到机械的大小、重量、经济性和维护保养等条件。则在一般情况下, 这种滑动轴承能否代替滚动轴承, 就成为问题。因而, 这些问题对滚动轴承制造厂, 提出了技术发展的新要求。

反过来说: 滚动轴承制造厂要预先估计轴承使用机械的性能逐步提高。为了满足这种要求, 应有计划、有组织地不断进行轴承的研究和试制。直到满足用户的要求, 而且, 反过来由于轴承技术的发展, 要求机械制造厂提高机械的性能。从而促进了机械技术的发展。

综上所述可以理解滑动轴承和滚动轴承的问题。滑动轴承是以理论为先导获得发展, 而滚动轴承则与之相反, 是以经验为先导发展的。所以继滑动轴承而能取代它的产品, 必须具有大量生产性能, 标准性、互换性、使用方便性、经济性等特点。由此, 可以理解滚动轴承发展的趋势。

进一步, 为了最终满足用户自己维修的要求而采用脂润滑滚动轴承, 解决了滑动轴承留下的供油和维护费时的问题。而且, 单套轴承即可同时承受径向和轴向负荷。润滑系统发生故障时, 轴承不会立即引起烧伤。即使引起烧伤, 只需更换轴承便可。使用耐热材料便更容易获得高温轴承, 诸如此类都比滑动轴承有利⁽¹⁾。

1.3 滚动轴承工程学概论

轴承技术包括加工、生产、材料、设计、性能、测试、标准、管理等有关技术。本文主要叙述与轴承设计和性能有关的技术, 特别是对滚动轴承发展有关的专门技术。因而, 一方面要结合社会需要为背景阐述滚动轴承工程学的进展。一方面分别阐明摩擦与磨损; 润滑剂

与润滑方法；弹性和运动；寿命与额定负荷；音响与振动等等。

1.3.1 摩擦与磨损

(1) 滚动摩擦

因为摩擦是无谓的消耗能量，一般认为这种能量损失，达到全世界所用能量的 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ ⁽²⁾ 轴承就是带着减少这种摩擦损失的使命而诞生并发展起来的。

滚动轴承与滑动轴承相比，其特点之一，就是由摩擦而造成的动力损耗很小。由经验得知此项法则的是在1901年，由德国的 R·STRIECK 测量⁽³⁾和比较得出了最初的定量经验公式，即轴承的摩擦系数等于：

$$\mu = \frac{M}{(P \cdot \frac{d}{2})} \quad (1-1)$$

在静摩擦中的摩擦系数：

滚动轴承为： $\mu = 10^{-3} \sim 10^{-2}$

滑动轴承为： $\mu = 10^{-2} \sim 10^{-1}$

所以滚动摩擦系数小于滑动摩擦系数。

在动摩擦中的系数大致相等，两者都为： $\mu = 10^{-3}$ 左右。

式中，M：轴承摩擦力矩；

P：轴承负荷；

d：轴承内径。

研究滚动摩擦小于滑动摩擦的起源，首先由16世纪的学者列奥纳多·达·芬奇(LEONARDO·DA·VINCI)，把此作为学科的对象进行探讨。而首次进行实验的是法国有名的 C A·COULOMB，至今仍属有效的滑动摩擦定律的发现者。他在1781年法国科学学会的获奖论文中，已明确表示滚动摩擦与负荷成比例，而与圆柱直径成反比。但对这个理论未作任何解释⁽⁴⁾。此后 100 多年的1876年英国的O·REYNOLDS，在其著名的润滑理论发表前数年，对滚子滚动摩擦进行过详细的实验。发表了差动引伸理论⁽⁵⁾，把滚动阻力发生原因与普通的滑动摩擦相联系。虽然，还不清楚这些古人，出自何种动机，选择滚动轴承为研究对象，但大概是想把古埃及时代的经验法则，用科学的眼光来从新评价吧！

从那时起大约 140 年以后，进入了产业革命的第三阶段。再次提出了滚动摩擦问题。此次研究显然是为了滚动轴承工业的需要。即，1919年瑞典的 A·PALMGREN，分析了在轴向负荷作用下球轴承的摩擦，提出了球的滚动差动滑动摩擦理论⁽⁶⁾；1929年英国的G.A·TOMLINSON提出了分子间引力理论⁽⁷⁾；1950年久田提出了接触面积理论⁽⁸⁾；同年曾田等提出了表面粗糙度理论⁽⁹⁾等等。说明了滚动摩擦的复杂而多样的性质像浮影一样。与此相反，直到1953年，英国的D·TABOR确立了近代的滑动摩擦凝着论，对滚动摩擦进行了挑战。即在1955年，研究了历来有关滚动摩擦起因的各种理论，以同一直径球体，测量滚动球的滚动摩擦，进行了巧妙的实验，认为即使除去所有的表面滑动，也存在着滚动摩擦，搞清了，因材料的弹性磁滞损失是引起内部摩擦的起因⁽¹⁰⁾。根据此项研究，澄清了滚动摩擦的本质，但在实际的滚动轴承中，由于出现曲率不同，还存在滚动接触面的高速滚动摩擦问题，这种滚动摩擦本身是一个很小的值。在测量技术上尚存在困难，因而这种现象还不能从测量中反映出来。

1961年佐佐木等确定的测试技术，是球在高速滚动摩擦中，利用球体旋转运动的衰减，

得知空气阻力是滚动摩擦原因之一。在乾燥状态下,表面粗糙度引起的冲突损失即为内部摩擦。在润滑状态下,润滑油的粘性摩擦是主要原因⁽¹¹⁾。从目前来说:高速滚动摩擦是根据滚动接触面的弹性流体润滑理论来进行研究的。

根据上述研究结果,了解到应用于滚动轴承中粗糙度很小的润滑表面,在滚动接触中其摩擦的主要原因是:在低速中是弹性燥滞损失;在高速中大部分是润滑剂的高压粘性磨擦;球在深沟中旋转时,其中增加了差动滑动摩擦。

(2) 滚动轴承的摩擦

在实际的球轴承中,没有单独的纯滚动运动,在承受轴向负荷时的球体中,除滚动运动外,尚伴随着由纯滑动运动引起的自转运动。并在1901年,由西德的 R·STRIECK 搞清楚⁽³⁾。以后,在1947年由美国的 H·PORITSKY,将这种自转滑动摩擦,作为刚体接触来分析⁽¹²⁾,得知轴承越小,球体的自转滑动摩擦,在整个轴承中佔的比例就愈大,上述虽是阐述小型球轴承的摩擦,但却是很重要的问题。

滚动轴承的摩擦,从20世纪初,滚动轴承作为工业生产以来,已有很多人进行过研究,这是因为摩擦是表示滚动轴承性能最好的尺度,因而,到1948年为止,通过实验明确了轴承的摩擦力矩主要依赖于旋转速度而变化的速度项,以及受轴承负荷支配而增大的负荷项,以其两者之和表示。并论述了各类轴承的摩擦力矩与旋转速度和轴承负荷之间的关系式⁽¹³⁾。另一方面,在理论研究中,负荷项企图用上述低速滚动摩擦理论的应用来说明,而在1919年 A·PALMGREN 以后获得进展。而速度项是在1934年由德国的 W·BÜCHE 用二个圆柱体滚动接触的弹性流体润滑理论的应用而开始研究的⁽¹⁴⁾。后者在当时是把轴承作为刚体来考虑的。但在此后,考虑到润滑油的高压粘度,以及接触面的弹性变形,试图应用弹性流体润滑理论来解释。对线接触滚子而言,利用电子计算机即可解得⁽¹⁵⁾,但在球体滚动的流体润滑中,尚未得到完全的解释。

总之,滚动轴承的摩擦包括:滚动体与套圈之间的滚动摩擦和滑动摩擦;滚子端面与套圈挡边面之间的滑动摩擦;保持架和滚动体及保持架和套圈引导面之间的滑动摩擦;由密封之类的密封装置引起的滑动摩擦,由润滑剂的搅拌阻力和空气阻力引起的摩擦。即使轴承类型一定,但由于负荷、旋转速度、润滑方法的不同,使轴承内部从境界润滑到流体润滑这样的宽范围内,由于摩擦面状态发生变化,其结果使轴承摩擦力矩的性质复杂化。

但是,轴承系的摩擦损失在设计阶段,可根据提出过的几种实验公式⁽¹⁶⁾,作一些粗略计算,另一方面,从摩擦理论分析的结果,可予先判断降低轴承摩擦的方法,试着进行轴承的改良⁽¹⁷⁾。

(3) 滚动轴承的磨损

只要润滑状态良好,滚动轴承因磨损或烧伤而不能使用的情况是很少见的。有关固体摩擦和烧伤原因的研究,是从1930年时由英国的 F·P BOWDEN 和 D·TABOR 运用巧妙的实验技术开始的,这个成果归纳在1951年著名的“固体摩擦与润滑”一书中⁽¹⁸⁾,在这个摩擦理论中指出,发生在固体表面的微小凹凸顶端,是建立在凝着理论的基础上,所以引用了真实接触面积,凝着力和闪光温度等几个新概念。并将这种方案,原封不动地应用于滚动轴承的摩擦、磨损与烧伤的研究中。日本对磨损问题的研究是从提高国产机械使用寿命的角度出发的,并从1937年由日本学术振兴会第六组开始进行研究。因而到第二次世界大战结束,以金属的磨损形态和发生机理为中心,不间断地进行了积极的研究。这个成果在1948年归纳在“金属的磨损”一书中⁽¹⁹⁾。再进一步,战后以东京大学、理工学研究所的曾田为中心,认为摩擦是

表面的破坏现象,开展了大量而独特的研究,此项成果归纳在1955年的“磨擦与润滑”一书中⁽²⁰⁾。这些摩擦或磨损的研究,都对轴承润滑问题的解决,提供了有益的根据。

在滚动轴承中,因保持架和滚子引导挡边的滑动面润滑困难,所以对该面进行了很多的研究,如1958年由笹田认为所谓的烧伤,就是磨损面处于熔融状态。通过实验求得,规定的保持架材料与轴承钢之间的极限值,建立了轴承钢材料的选定基准⁽²¹⁾。即润滑油膜对磨损的影响极为显著。即使添加很少量的润滑剂,只要有一些,磨损就会减小到干燥状态下的 $1/10$ 。一旦油膜破裂,金属之间便会发生摩擦。磨损表面的形态,取决于此时的压力和速度,如果它处于熔融状态,即为烧伤。另外,如果是机械磨损形态,则磨损的进展缓慢。因而,要防止轴承的烧伤和磨损,首先要润滑良好,避免油膜破裂。然后要选择难以形成熔融状态的复合摩擦材料是很重要的。进一步,从研究与轴承负荷有关的负荷滚子端面与引导挡边表面之间滑动面的结果,可以弄清该表面上流体润滑油膜的形成情况⁽²²⁾。

不用说,由滚动疲劳引起的剥落是滚动轴承达到寿命的原因之一。但在实际使用中,轴承往往是由于磨损引起精度、音响、振动等性能下降而达到寿命。例如:1964年西德的ESCHMANN在欧洲将7000个以上滚动轴承的使用条件,按不同的使用机械进行分类,这些轴承由于径向游隙增大而产生磨损,把达到轴承更换前的运转时间分佈,作为韦布尔数据处理⁽²³⁾。根据这些研究,如滚动轴承的使用机械确定,则有可能根据磨损算出轴承寿命时间。但是这种磨损寿命的性质,有随着润滑剂和密封技术的进展而得到延长。所以今后仍有继续研究的必要。但不管怎么说:滚动轴承在实际中的寿命,虽然不仅仅是由于疲劳寿命而更换,但事实上它仍作为定量处理,因而,就可靠性而论滚动疲劳寿命在今后仍为滚动轴承重要课题之一。

另一方面,由于弹性流体润滑理论与实验的进展,在滚动轴承的滚动面上形成油膜是有可能的,所以适当选择轴承的使用条件,几何精度正确的轴承,采用完全密封,认为有充分把握防止轴承磨损,即可将滚动轴承作为油膜轴承看待,这也是今后的课题之一。

滚动轴承由磨损引起的损伤有摩擦腐蚀和蠕动,这些原因是可以解释清楚的,但要全部防止是困难的⁽²⁴⁾,即摩擦腐蚀与极低滑动速度下的滑动磨损,在本质上是相同的,其特点是产生红褐色的氧化磨损粉,是滚动体在滚道上仅作微小距离的摆动运动,而在这样的接触面上,润滑剂很难流入时发生的。在蠕动中有滚动蠕动和滑动蠕动二种:前者发生在轴承为动配合而承受旋转负荷的场合。后者在相同轴承的摩擦力矩较大时容易发生⁽²⁵⁾。为防止此类损伤,要考虑各种各样的方法。

1.3.2 润滑剂与润滑方法

(1) 润滑油

为了减少两个固体在滑动接触时发生的阻力——摩擦,在公元前1400年时,已在牛车的车轴中使用了油脂⁽²⁶⁾。

在1859年美国开始开采石油成功之前,润滑油是以动植物油作为原料的。20世纪初期,滚动轴承进入工业生产,替代了滑动轴承,此时,润滑剂分为半固体的“脂”和液体的“油”,它是以石油为原料发展起来的。滑动轴承受动作原理所限,要求使用液体。而滚动轴承不仅能使用油,而且也能使用脂。这种使用方便是滚动轴承一个很大的特点。

也就是说:油润滑时,为了防止油的泄漏,需要采用密封装置,并且要注意润滑油的补给。脂润滑则无油泄漏之虑,因而轴承系的设计可简单。而且,维护保养方便,这种特点符

合1910年按福特制方法大量生产汽车的需要。

就润滑油而言,开始广泛采用由石油中提炼出来的矿物油,1920年初简单地称为机械油。而在1920年代末就分为轻、中、重机械油。从1934年起直到今天,一直习用透平油、机器油和气缸油的名称。战争时期,需要良好性能的轴承,就要相应使矿物油精制和提高性能,所以研究工作,集中于添加剂方面。另一方面,因德国石油资源缺乏,在1939~1945年间,在试制成功人工合成油的基础上,研制脂系油^[27]。从此以后,世界各地广泛开展了合成油的研究,以期获得各种性能的合成油。

目前,合成油价格虽高,但它具有滚动轴承需要的高温稳定性、低蒸汽压性、以及在较大温度范围内粘度变化很小等性能,所以在高可靠性的航空发动机与仪器之类轴承中,广泛应用多价脂油、聚苯醚、氟油、硅油之类合成润滑油。

(2) 润滑脂

润滑脂是在润滑油中将钠(Na)、锂(Li)、锶(Sr)、钡(Ba)、钙(Ca)、铝(Al)之类脂肪酸盐的皂基作为增稠剂进行物理混合,再加上添加剂,因而具有物理粘弹性的复杂性质。

日本从1920年开始生产国产脂,到20年代末有高温和低温黄油(润滑脂)之分,作为电机脂使用。在1939年日本工业标准中规定了三种脂:第一种脂是电机脂(黄油);第二种脂是纤维状润滑脂;第三种是齿轮用润滑脂。其他方面,由于战前飞机需要量不断增加,开始研究机体用润滑脂。而且,在1945年第二次世界大战结束时,作为日本国营铁路现代化规划的一个环节,开始实行车辆用轴承的滚动轴承化,为此各种润滑脂的系统研究,以国营铁路为中心,蓬勃地发展起来了。

另一方面,在1945年时,以微型电机为主要用途的标准尺寸球轴承,使用了天然或人工橡胶和金属板的接触式或非接触式脂润滑密封球轴承,已开始大量生产。采用这种轴承可使电机摩擦引起的耗电量小和省去给油的麻烦,并且可满足用户维修的要求。但是予填入轴承内的润滑脂对轴承本身的使用寿命,起着决定性的重大作用。所以要求其高、低温性能良好,寿命长和噪声小。特别是为了达到低噪声,对润滑脂中所含尘埃和夹杂物的含量,作出限量的规定、因而,有关脂寿命方面,有SKF公司^[28]于1945年、ND公司^[29]于1955年、茂庭等于1961年^[30]、铃木于1971年^[31]均进行过研究,分别制定了脂寿命或脂更换期的标准。

脂润滑密封球轴承包括接触式和非接触两种。从1950年后它迎来了日本家庭电气化的新时代,极广泛地用于电动除尘器、洗衣机、冷暖器设备、电动工具或小轿车后轮、农业机械、情报处理机械等等。佔当前球轴承产量的80%,而且有进一步增强的倾向。但是,在脂润滑中,还有许多基本问题尚未搞清,如润滑脂的润滑机理在轴承内部的流动机理与密封机理等等。

1945年以来,合成油走向实用阶段,润滑脂的基油使用合成油代替矿物油。而且使用高级锂皂基增稠剂,进而使用耐高温的膨润土和硅胶来代替皂基,使用各种各样的无皂润滑脂(即合成脂),以适应滚动轴承日益多样化的用途。

当前润滑脂的问题是研制使用于高速中的长寿命脂。

(3) 润滑方法

决定滚动轴承的极限转速是轴承温度,温度超过100℃时,一般轴承材料硬度降低,并且润滑剂发生氧化,滚动轴承性能因之降低。

又因滚动轴承的发热量与转速和轴承摩擦力矩的乘积成正比。所以以飞机为代表的高性