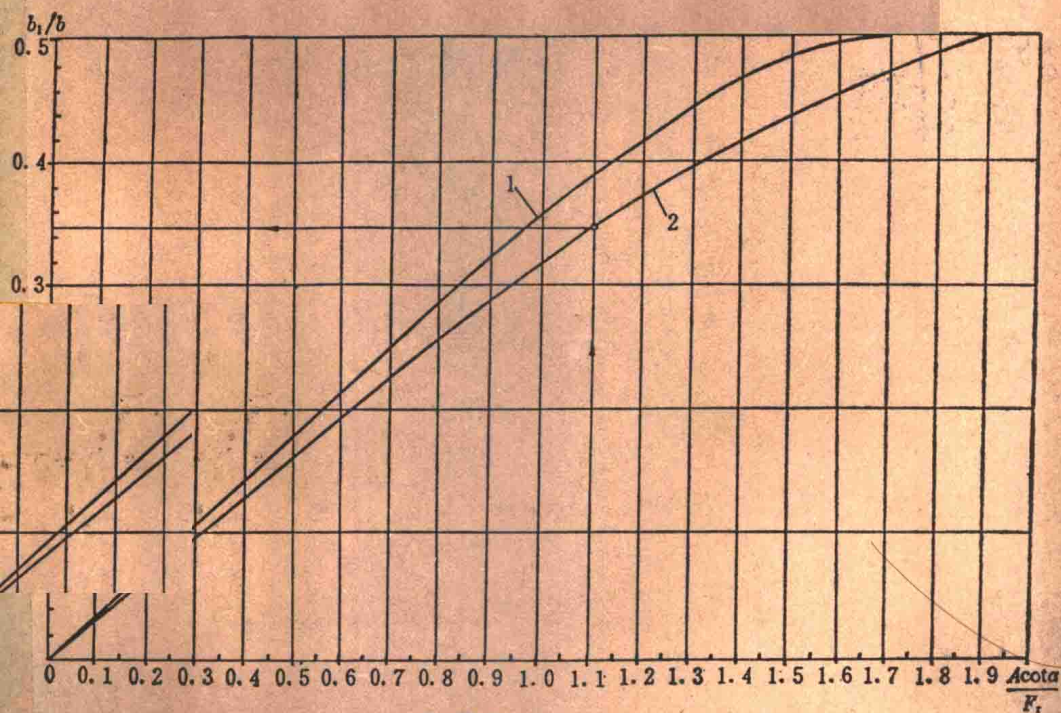


高等学校教学参考书

滚动轴承计算

— 额定负荷、当量负

余俊编著



高等教育出版社

高等学校教学参考书

滚动轴承计算

——额定负荷、当量负荷及寿命

余 俊 编著

高等教育出版社

(京)112号

内 容 提 要

本书完整而系统地介绍了最新国际标准和国家标准的滚动轴承的计算方法,着重基本原理的介绍,不仅有公式推导,更重要的是对滚动轴承计算本质的揭示。

本书包括了滚动轴承的额定动负荷、当量动负荷和寿命以及额定静负荷、当量静负荷的计算方法,同时也介绍了寿命计算和额定静负荷计算的最新方法和发展趋势。内容全面而详尽,传统与新颖内容具备。

本书适用于从事机械设计的教学人员及滚动轴承工作者,并可作为大学生和研究生的选修课教材。

高等学校教学参考书

滚 动 轴 承 计 算

——额定负荷、当量负荷及寿命

余俊 编著

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

开本 850 × 1168 1/32 印张 8.375 字数 200 000

1993年7月第1版 1993年7月第1次印刷

印数 0001—2 536

ISBN7-04-003581-2/TH·285

定价 5.20 元

前 言

滚动轴承的额定负荷、当量负荷及寿命的计算方法已由ISO 281及ISO76发表过大量的文件和资料,但迄今为止还没有一本书完整而系统地介绍这方面的工作。资料分散难找,加上公式推导繁复,往往使学习滚动轴承基本原理或从事滚动轴承设计及研究的人员感到不便。因此,编写这一本书是非常必要的,可以说是一项有关滚动轴承计算的基本建设。

本书内容着重滚动轴承ISO计算方法基本原理的介绍,不仅有公式的推导,更重要的是对滚动轴承计算的本质的揭示;不仅对现行国家标准作介绍,而且对最近公布的国际标准也作了全面的介绍,传统与新颖内容俱备。详尽的论证及深入的分析对初学者会有所帮助,对有经验的滚动轴承工作者及从事机械设计教学的人员来说,也是一本经常查阅的案头良友。

本书第一章讨论了滚动轴承疲劳问题指数型基本公式以及由此引伸出来的寿命计算基本方法。第二章的滚动轴承负荷分布、负荷平衡及平均负荷是计算的基础。在第一章及第二章的基础上介绍了第三章及第四章额定动负荷的计算方法,主要是各种轴承的系数 f 的计算。随后便进入第五章,分析当量动负荷。接触角的变化及当量动负荷曲线的简化是讨论的重点。第六章讨论内部轴向力。第七章讨论常见的一种向心推力轴承成对布置的计算方法。第八章介绍各种修正寿命的计算方法以及修正常数,还讨论了现存问题及发展趋势。第九、十两章为国家标准及最新国际标准的额定静负荷及当量静负荷的计算方法。最后在附录中列举了几种常用滚动轴承的额定负荷计算的数据,便于读者使用。

本书承机械电子工业部万长森同志审阅。在编写过程中得到了洛阳工学院姚松官老师和武汉石油化工学院张幼卿老师的帮助,一并表示谢意。

本书可作为从事机械设计课程教学的教师和从事滚动轴承设计及研究的工作人员参考,也可作为大学生和研究生的选修课教材,望读者对本书提出批评和意见。

编 者

1991年5月

符 号 表

- A —— 轴向外负荷, 系数
 a —— 接触椭圆长半轴长度, 负荷中心到轴承中心平面之间的距离, 常数, 系数
 B —— 系数
 b —— 接触椭圆短半轴长度
 b_m —— 考虑材料及制造质量对额定动负荷的影响系数
 C_r —— 径向基本额定动负荷
 C_a —— 轴向基本额定动负荷
 C_i —— 内圈的额定动负荷
 C_e —— 外圈的额定动负荷
 C_{er} —— 有效径向额定动负荷
 C_{ea} —— 有效轴向额定动负荷
 C_{a1} —— 推力轴承中旋转圈的额定动负荷
 C_{a2} —— 推力轴承中固定圈的额定动负荷
 C_{0r} —— 径向基本额定静负荷
 C_{0a} —— 轴向基本额定静负荷
 c —— Hertz 压缩常数量, 单位接触长度的量, 常数
 D_i —— 滚动体内滚道直径
 D_e —— 滚动体外滚道直径
 $D(e)$ —— $K(e)$ 及 $L(e)$ 的组合量
 D_w —— 滚动体直径
 D_{wc} —— 计算滚子轴承额定负荷时所用的直径
 D_{pw} —— 滚动体节圆处的直径
 E_1, E_2 —— 接触体 1, 2 的弹性模量
 E_0 —— 综合弹性模量
 e —— 轴向负荷影响系数, $e = \sqrt{1 - (b/a)^2}$, 常数
 F —— 破坏概率, 径向外负荷
 $F(\rho)$ —— 曲率函数

- F_r ——轴承的径向负荷
 F_a ——轴承的轴向负荷
 f_c ——与轴承零件的几何形状、制造精度和材料性质有关的系数，计算额定动负荷用
 f_0 ——与轴承零件的几何形状、制造精度和材料性质有关的系数，计算额定静负荷用
 $(f_0)_i$ ——以内滚道为基准的 f_0 之值
 $(f_0)_o$ ——以外滚道为基准的 f_0 之值
 f_e ——比值 r_e/D_w
 f_i ——比值 r_i/D_w
 h ——油膜厚度，常数
 i ——滚动体列数
 J ——负荷分布积分
 J_r ——负荷分布的径向积分
 J_a ——负荷分布的轴向积分
 J_1 ——滚动体与内圈接触时滚动体的平均负荷积分
 J_2 ——滚动体与外圈接触时滚动体的平均负荷积分
 $K(e)$ ——第一类完全椭圆积分
 k ——椭圆常数 a/b ，曲率，常数
 L ——滚动轴承寿命
 L_a ——以百万次转数为单位的滚动轴承寿命
 L_{10} ——基本额定寿命
 L_i ——内圈的额定寿命
 L_o ——外圈的额定寿命
 L_{na} ——用系数 a 修正的滚动轴承寿命
 L_n ——不同可靠度的滚动轴承寿命
 L_{min} ——最小寿命
 $L(e)$ ——第二类完全椭圆积分
 L_{we} ——计算滚子轴承额定负荷时所用的长度
 l ——滚道长度
 m ——常数
 m_a, m_b ——决定接触椭圆的长半轴和短半轴的参数

N —— 使用概率为 S 时的应力循环次数

N_1 —— σ_1 作用下的应力循环次数

N_e —— 当量循环次数

n —— 轴承转速

n_i —— 轴承内圈转速

n_e —— 轴承外圈转速

n_{pw} —— 滚动体中心转速(保持器转速)

n_{pwi} —— 滚动体中心相对于内圈的转速

n_{pwe} —— 滚动体中心相对于外圈的转速

n_i —— 外圈的弹性趋近量系数

n_e —— 内圈的弹性趋近量系数

P —— 当量动负荷

P_r —— 径向当量动负荷

P_a —— 轴向当量动负荷

P_i —— 内圈的当量动负荷

P_e —— 外圈的当量动负荷

P_0 —— 当量静负荷

P_{0r} —— 径向当量静负荷

P_{0a} —— 轴向当量静负荷

p —— 常数

Q —— 滚动体负荷

Q_0 —— 滚动体额定动负荷

Q_{c1} —— 滚动体与内圈接触时滚动体的额定动负荷

Q_{c2} —— 滚动体与外圈接触时滚动体的额定动负荷

Q_i —— 滚动体与内圈接触时滚动体的平均负荷

Q_e —— 滚动体与外圈接触时滚动体的平均负荷

Q_{c1} —— 滚动体与止推轴承旋转圈接触时滚动体的额定动负荷

Q_{c2} —— 滚动体与止推轴承固定圈接触时滚动体的额定动负荷

R —— 滚动体半径, 表面不平度

R_c —— 洛氏硬度

r —— 滚道槽半径

r_i —— 内滚道槽半径

r_c ——外滚道槽半径
 S ——材料能承受百万次应力循环的使用概率, 内部轴向负荷
 S_i ——内圈的使用概率
 S_o ——外圈的使用概率
 s ——常数, 参数
 T ——负荷分布参数
 t ——常数, 参数
 u ——轴承转动一圈时, 滚动体和滚道上一点的接触应力循环次数
 u_i ——轴承内圈转动时, 内滚道上一点与滚动体接触的总循环次数
 V ——承受应力的体积
 v_i ——滚动体与内圈接触点的滚动体速度
 v_o ——滚动体与外圈接触点的滚动体速度
 v_{pw} ——滚动体节圆处的速度
 w ——常数
 X ——计算当量动负荷时的径向负荷系数
 X_1 ——单列轴承的径向负荷系数
 X_2, X_3 ——双列轴承的径向负荷系数
 X_{a1} ——单列推力轴承的径向负荷系数
 X_{a2}, X_{a3} ——双列推力轴承的径向负荷系数
 X_0 ——计算当量静负荷时的径向负荷系数
 Y ——计算当量动负荷时的轴向负荷系数
 Y_1 ——单列轴承的轴向负荷系数
 Y_2, Y_3 ——双列轴承的轴向负荷系数
 Y_0 ——计算当量静负荷时的轴向负荷系数
 Y_{a1} ——单列推力轴承的轴向负荷系数
 Y_{a2}, Y_{a3} ——双列推力轴承的轴向负荷系数
 y_c ——内部轴向负荷作用处与轴承中心之间的距离
 Z ——滚动体个数
 z_0 —— r_0 处的深度
 α ——接触角
 α_0 ——初始接触角
 α_s ——仅承受轴向负荷时的接触角

γ —— 比值 $D_w \cos \alpha / D_{pw}$
 δ —— 接触点的弹性变形量
 δ_a —— 接触点的轴向弹性变形量
 δ_r —— 接触点的径向弹性变形量
 ξ —— 参数
 η —— 降低系数
 θ —— 参数
 λ —— 降低系数, 膜厚比
 μ —— 泊松比
 ν —— 降低系数, 润滑剂粘度
 ξ —— 比值, $J_s(0.5) / J_r(0.5)$
 ρ —— 曲率半径
 σ —— 应力
 σ_s —— 当量应力
 τ —— 剪应力
 τ_0 —— 接触面下最大正交剪应力
 Φ —— 常量
 ψ —— 相邻滚动体之间的夹角
 Ω —— 与曲率半径有关的常量

目 录

前言	1
符号表	1
第一章 滚动轴承疲劳寿命的计算	1
§ 1-1 处理滚动轴承疲劳问题的指数型公式	1
§ 1-2 承受应力的体积 V 的计算	3
§ 1-3 应力循环次数 N 的计算	3
§ 1-4 最大正交剪应力 τ_0 及深度 z_0 的计算	6
§ 1-5 接触椭圆尺寸及弹性变形的计算	17
§ 1-6 点接触疲劳寿命的基本公式	18
§ 1-7 线接触疲劳寿命的基本公式	24
第二章 滚动轴承中的负荷分布	30
§ 2-1 单列滚动轴承的负荷分布	30
§ 2-2 滚动轴承负荷平衡分析	35
§ 2-3 双列轴承的负荷分布	43
§ 2-4 滚动体的平均负荷	46
第三章 点接触滚动轴承的基本额定动负荷	52
§ 3-1 滚动轴承基本额定动负荷的一般形式	52
§ 3-2 球轴承的基本额定动负荷的计算	55
§ 3-3 向心球轴承 f_0 的计算	58
§ 3-4 名义接触角 $\alpha \approx 90^\circ$ 时单列推力球轴承的 基本额定动负荷计算	61
§ 3-5 名义接触角 $\alpha \approx 90^\circ$ 时单列推力球轴承的 f_0 的计算	64
§ 3-6 名义接触角 $\alpha = 90^\circ$ 时单列推力球轴承的 基本额定动负荷及 f_0 的计算	66
§ 3-7 多列推力球轴承的基本额定动负荷计算	68

第四章 线接触滚动轴承的基本额定动负荷.....70

- § 4-1 线接触滚动轴承的基本额定动负荷和 f_0 的计算.....70
- § 4-2 名义接触角 $\alpha \approx 90^\circ$ 时单列滚子轴承的基本额定动负荷和 f_0 的计算.....73
- § 4-3 名义接触角 $\alpha = 90^\circ$ 时单列滚子轴承的基本额定动负荷和 f_0 的计算.....76
- § 4-4 多列推力滚子轴承的基本额定动负荷.....78

第五章 滚动轴承的寿命及当量动负荷.....80

- § 5-1 滚动轴承内、外圈的寿命及当量动负荷.....80
- § 5-2 滚动轴承的寿命及当量动负荷.....83
- § 5-3 球轴承的接触角.....85
 - 一、接触角的变化.....85
 - 二、压缩常数 c 的计算.....89
 - 三、 $\alpha_0 = 5^\circ \sim 15^\circ$ 向心推力球轴承接触角 α 的计算.....90
 - 四、 $\alpha_0 = 20^\circ \sim 45^\circ$ 向心推力球轴承接触角 α 的计算.....92
 - 五、 $\alpha_0 = 0^\circ$ 向心球轴承接触角 α 的计算.....93
- § 5-4 接触角不变化时单列轴承的当量动负荷.....94
- § 5-5 接触角不变化时单列轴承的当量动负荷曲线的简化.....101
 - 一、线接触情况, 单列圆锥滚子轴承.....106
 - 二、点接触情况, 单列调心球轴承.....107
 - 三、点接触情况, 单列向心推力球轴承($\alpha_0 = 20^\circ \sim 45^\circ$).....108
 - 四、点接触情况, 分离型向心推力球轴承.....110
- § 5-6 接触角变化时单列向心球轴承的当量动负荷.....111
- § 5-7 接触角变化时单列向心球轴承的当量动负荷曲线的简化.....116
 - 一、0000型向心球轴承.....116
 - 二、36000 型向心推力球轴承.....121
- § 5-8 双列向心轴承的当量动负荷.....122
- § 5-9 双列向心轴承的当量动负荷曲线的简化.....129
 - 一、 $\alpha_0 = 0^\circ$ 的双列向心球轴承.....132
 - 二、双列调心轴承.....132
 - 三、 $\alpha_0 \leq 15^\circ$ 的双列向心推力球轴承.....133

四、 $\alpha_0 = 20^\circ \sim 45^\circ$ 的双列向心推力球轴承	137
五、双列圆锥滚子轴承	138
§ 5-10 推力轴承的当量动负荷曲线的简化	139
一、推力球轴承	140
二、推力滚子轴承	142
第六章 滚动轴承的内部轴向负荷	146
第七章 一个支点上安装一对相同的向心推力轴承的计算	152
第八章 滚动轴承寿命公式的修正及讨论	167
§ 8-1 国标GB6391—86的修正方法	168
§ 8-2 ISO 1986 年的修正方法	170
§ 8-3 对寿命修正的其他方法	171
§ 8-4 系数 a_1, a_2, a_3, a_{23} 及 b_m 之值	172
§ 8-5 寿命公式的使用范围	180
§ 8-6 滚动轴承计算方法的发展及讨论	182
第九章 滚动轴承的额定静负荷	188
§ 9-1 以塑性变形为基础的额定静负荷计算	188
一、向心及向心角接触深沟型球轴承的基本额定静负荷	190
二、调心球轴承的基本额定静负荷	192
三、推力球轴承的基本额定静负荷	195
四、向心及向心推力滚子轴承的基本额定静负荷	197
五、推力滚子轴承的基本额定静负荷	198
§ 9-2 以接触应力为基础的额定静负荷计算	201
一、向心球轴承的基本额定静负荷	204
二、调心球轴承的基本额定静负荷	207
三、推力球轴承的基本额定静负荷	208
四、向心及向心推力滚子轴承的基本额定静负荷	211
五、推力滚子轴承的基本额定静负荷	212
第十章 滚动轴承的当量静负荷	217
§ 10-1 接触角 α_0 不改变时的当量静负荷	217
§ 10-2 接触角 α_0 改变时的当量静负荷	221

一、 $\alpha_0=0^\circ$ 的情况.....	221
二、 $\alpha_0\neq 0^\circ$ 的情况.....	224
§ 10-3 推力轴承的当量静负荷.....	228
附录 计算额定负荷的数据.....	230
一、向心球轴承(深沟轴承)(0000型).....	231
二、短圆柱滚子轴承(加强型)(2000型).....	234
三、调心滚子轴承(双列向心球面滚子轴承)(3000型).....	238
四、向心推力球轴承(角接触球轴承)(6000型).....	241
五、圆锥滚子轴承(加强型)(7000型).....	244
参考文献.....	250

第一章 滚动轴承疲劳寿命的计算

滚动轴承的疲劳寿命是统计的量,是离散的。疲劳寿命的可靠性分析和 Hertz 接触应力计算是确定额定动负荷的基础。现行 ISO 及 GB 关于滚动轴承的计算方法,是瑞典人 G. Lundberg 和 A. Palmgren 在充分考虑上述原则后提出的。本章介绍这个计算方法的基础部分。

§ 1-1 处理滚动轴承疲劳问题的指数型公式

G. Lundberg 和 A. Palmgren 等人在否定了他们自己早年提出的工作能力系数法以后,提出了下列处理滚动轴承疲劳问题的指数型经验公式

$$\ln \frac{1}{S} \propto \frac{\tau_0^c N^e V}{z_0^h} \quad (1-1)$$

式中 S ——材料能承受 N 百万次应力循环的使用概率。

$S = 1 - F$, F 为破坏概率;

τ_0 ——在接触表面下最大正交剪应力;

z_0 ——产生 τ_0 处的深度;

N ——使用概率为 S 时的应力循环次数;

V ——承受应力的体积;

c, e, h ——待定指数。

建立式(1-1)的出发点是:

(1) 材料因疲劳而破坏的使用概率 S 与应力循环次数 N 有关。循环次数愈多,则破坏的可能性愈大,使用概率 S 就愈小。

(2) 滚动接触的内部剪应力,对疲劳破坏起着决定性的作用。

因为滚动轴承在运转过程中接触点不断地变化，材料内部任一点都承受剪变应力，因此，在计算滚动轴承的寿命时，应该用振幅值最大的剪应力 τ_0 为基础。

图 1-1 为接触表面下剪应力的示意图。原点为接触点。 x 轴与接触椭圆的长轴 $2a$ 的方向一致； y 轴与接触椭圆的短轴 $2b$ 的方向一致，也是滚动体滚动的方向； z 轴与滚动体法线方向一致。

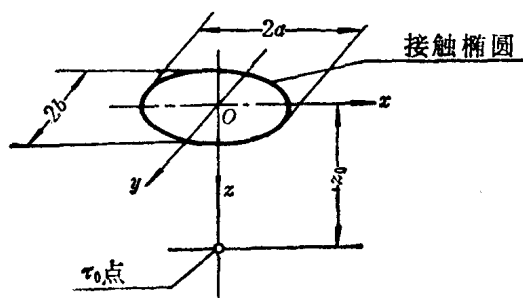


图 1-1 最大剪应力位置示意图

在接触表面下，剪应力在 $z=z_0, x=y=0$ 处，达到最大值 τ_0 。在滚动接触过程中，疲劳裂纹往往发生在 τ_0 附近区域。因此， τ_0 之值愈大，则使用概率愈小。

(3) 在深度 z_0 处产生裂纹后，要经过一段时间，内部裂纹才扩展到表面。 z_0 之值愈大，所经历的时间也就愈长。因此， z_0 之值愈大，则使用概率 S 也愈大。

(4) 材料是有缺陷的，如内部晶体结构的缺陷以及气孔、夹渣等等。承载的体积 V 愈大，则包含这些缺陷的可能性也愈多，因此，使用概率 S 也就愈小。

由以上分析可以看出，式(1-1)是有一定物理意义的。该式采用了指数表达形式，可以调整三个待定指数的数值使滚动轴承的计算寿命与实际的相接近。

式(1-1)也存在着一些不足之处，我们将在以后讨论。

§ 1-2 承受应力的体积 V 的计算

在点接触中, 可以假定承受应力的体积是接触椭圆主轴 $2a$, 表层下最大垂直剪应力 τ_0 发生处的深度 z_0 及滚道长度 l 的乘积, 见图 1-2。 V 的计算公式为

$$V \propto az_0 l \quad (1-2)$$

在线接触中, 承受应力的体积为滚子的有效长度 L_{we} , 深度 z_0 及滚道长度 l 的乘积。 V 的计算公式为

$$V \propto L_{we} z_0 l \quad (1-3)$$

式中 L_{we} ——滚子有效长度, 见图 1-2。

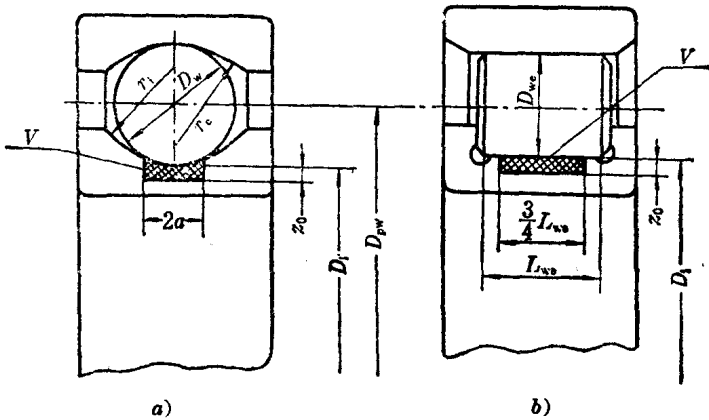


图 1-2 承受 τ_0 的体积 V 示意图

接触区的滚道长度 l 为

$$l = \pi D_1 \quad (1-4)$$

式中 D_1 ——内滚道直径, 见图 1-2。

§ 1-3 应力循环次数 N 的计算

以百万次为单位的应力循环次数 N 为

$$N = u L_s \quad (1-5)$$