

滚动轴承系统应用的 现代设计方法

刘 冲 编著

海 洋 出 版 社

滚动轴承系统应用的现代设计方法

刘 冲 编著

海 洋 出 版 社

1993 · 北京

内容简介

本书主要介绍了滚动轴承系统应用的现代设计方法,即通过滚动轴承系统的可靠性与寿命要求展开滚动轴承应用的系统设计,使所选择滚动轴承组成的系统在使用中达到系统的设计要求。本书系统地叙述了滚动轴承系统的可靠性与寿命问题、动态载荷分析方法、滚动轴承承受外载荷的确定、润滑设计、装配要求系统设计、滚动轴承选型设计及影响滚动轴承寿命的诸因素分析,在内容上反映了国内外滚动轴承应用技术的新成就。

本书作为一部系统介绍现代滚动轴承系统应用设计的参考书,有利于提高滚动轴承应用设计的水平。可供机械设计、制造的工程技术人员使用,也可供工科院校师生及研究生在机械设计课程的学习和教学中参考。

(京)新登第087号

滚动轴承系统应用的现代设计方法

海洋出版社出版(北京市复兴门外大街1号)

新华书店北京发行所发行 北京二外印刷厂印刷

开本:787×1092 1/32 印张10.8125 字数:200千字

1993年10月第一版 1993年10月第一次印刷

印数:1—2500册

*

ISBN 7-5027-3233-0/TH·3

定价:6.20元

前 言

滚动轴承是一种具有高度互换性的标准化部件,由于它具有摩擦力小、起动容易、润滑简单、便于更换等优点,所以在各种现代机械中它几乎是不可缺少的部件,作为重要的机械基础件,滚动轴承是各种机械中传递运动和承受载荷的重要支承零件。如何设计滚动轴承系统,如何使滚动轴承系统达到规定的可靠性和寿命,如何使滚动轴承在各种工况条件下达到性能好、寿命长、可靠性高,这是轴承应用设计者所关心的重要问题。只有充分考虑影响滚动轴承系统可靠性和寿命的各种因素,对滚动轴承系统的应用进行系统设计,才能够完全发挥轴承的优良性能,以达到预期的使用寿命。所以,严格地讲,离开了滚动轴承系统的合理选型设计和合理使用,就无法考虑轴承的使用寿命。

滚动轴承的应用设计是一门很重要的实用技术,它包括设计、制造、装配和使用等知识,如果对滚动轴承选型得当,又掌握相应的轴承应用和维护保养知识,就能够确保滚动轴承的性能的发挥和寿命的提高。

所谓现代设计法,就是采用相关分析和谱分析等信号分析法来提取最合理的数据,这是一种科学的设计方法。现代设计方法的特点是:从静态设计发展到动态设计,从单项设计指标发展到综合设计指标,从常规设计发展为精确设计。滚动轴承系统应用的现代设计方法是根据现代设计方法学中的可靠性设计法、信号分析法、系统分析设计法、动态分析设计法以

及当代滚动轴承研究的最新成果而提出的滚动轴承应用设计的一种新方法。该方法不单纯涉及滚动轴承的选定,而且开展了可靠性与寿命分析、承受外载荷分析、润滑设计、装配要求系统设计等研究,确保所选择的滚动轴承组成的系统达到滚动轴承系统预期的可靠性和寿命要求。

本书的第一章简述了滚动轴承系统应用的现代设计法。第二~六章详细介绍了滚动轴承系统应用的主要设计内容,其中第二章讨论了滚动轴承可靠性与寿命问题,根据滚动轴承系统可靠性和寿命确定每只滚动轴承定义可靠度为90%的额定寿命;第三章介绍了滚动轴承承受外载荷的确定方法,力求更准确地得到滚动轴承承受的外载荷;第四章介绍了滚动轴承系统的润滑设计问题,根据工况条件确定理想的润滑方式和润滑剂;第五章介绍了滚动轴承装配要求的设计内容;第六章展开了滚动轴承的选型设计。最后在第七章重点讨论了影响滚动轴承疲劳寿命的诸因素,以及这些因素对寿命的影响程度。本书在结尾还列出了常用滚动轴承性能、配置方式及各类滚动轴承的标准代号,可供选型时参考。

本书是在参阅国内外有关资料,并结合作者近年来在此课题方面所发表的有关论文及在煤炭科学研究总院北京建井研究所工作期间所从事“减速器系统可靠性和寿命”课题攻关的经验基础上编写而成。由于水平有限,难免有不妥之处,敬请专家和读者批评指正。

本书由中国矿业大学北京研究生部吴永伟教授主审阅,在此表示感谢。

刘 冲

1993年6月

目 录

第一章 概 论	1
第一节 概 述.....	1
第二节 滚动轴承选型设计方法.....	2
第三节 滚动轴承系统可靠性与寿命问题.....	6
第四节 影响滚动轴承寿命的因素.....	8
第五节 滚动轴承系统应用的现代设计方法	15
第二章 滚动轴承的可靠性与寿命分析	17
第一节 滚动轴承系统的可靠性与寿命分析	17
第二节 滚动轴承系统可靠度的分配	22
第三节 滚动轴承额定寿命的确定	26
第三章 滚动轴承承受外载荷的确定	30
第一节 概 述	30
第二节 滚动轴承承受外载荷的确定方法	32
第三节 滚动轴承承受载荷的理论计算	41
第四节 变载荷向稳定载荷的等效转换	73
第四章 滚动轴承润滑设计	77
第一节 滚动轴承润滑方式的选择	77
第二节 润滑剂的选择	85
第三节 润滑剂用量的确定.....	114
第四节 更换润滑剂周期的确定.....	123
第五章 滚动轴承装配要求系统设计	129
第一节 滚动轴承与轴和座孔的配合设计.....	129

第二节	与滚动轴承配合的轴和座孔精度及 表面粗糙度的选择·····	135
第三节	滚动轴承的轴向紧固与预紧设计·····	143
第四节	滚动轴承的密封设计·····	159
第五节	滚动轴承装配清洁度设计·····	175
第六节	滚动轴承的安装与拆卸要求·····	179
第六章	滚动轴承的选型设计·····	189
第一节	滚动轴承的代号·····	189
第二节	滚动轴承结构类型的选定·····	194
第三节	滚动轴承材料及冶炼方法的选择·····	206
第四节	滚动轴承游隙的选定·····	208
第五节	滚动轴承精度等级的选定·····	218
第六节	工作要求滚动轴承额定动负荷的计算·····	221
第七节	滚动轴承的选定·····	235
第八节	滚动轴承静强度审定·····	236
第九节	滚动轴承极限转速的审定·····	239
第十节	滚动轴承调心性能的审定·····	244
第十一节	滚动轴承摆动角的审定·····	246
第七章	影响滚动轴承疲劳寿命的诸因素及其计算·····	247
第一节	可靠性对滚动轴承疲劳寿命的影响·····	247
第二节	润滑对滚动轴承疲劳寿命的影响·····	249
第三节	润滑剂的清洁度对轴承疲劳寿命的影响·····	253
第四节	轴承材料对轴承疲劳寿命的影响·····	256
第五节	滚动轴承径向游隙对轴承疲劳寿命 的影响·····	260
第六节	轴向偏斜对轴承疲劳寿命的影响·····	265
第七节	冲击负荷对轴承疲劳寿命的影响·····	266

第八节 综合寿命修正系数 a_{23} 的确定	267
第九节 SKF 综合寿命修正系数 a_{SKF} 的确定	271
附录一 常用滚动轴承性能	275
附录二 滚动轴承配置方式示例	306
附录三 常用滚动轴承结构型式及标准编号	314
参考文献	331
基本符号	334

第一章 概 论

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上的负荷,并与机座作相对旋转、摆动等运动,以求在较小的摩擦力矩下,达到传递功率的目的。与滑动轴承相比,滚动轴承具有下列优点:

- (1) 轴承应用设计简单;
- (2) 产品已标准化,并由专业生产厂家进行大批量生产;
- (3) 具有优良的互换性和通用性;
- (4) 孔和轴容易加工;
- (5) 装配后一般不需反复调整;
- (6) 可采用脂润滑;
- (7) 易于润滑、维护及保养,可以避免配备专用的润滑系统;
- (8) 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;
- (9) 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;
- (10) 大多数类型的轴承能同时承受径向和轴向负荷;
- (11) 轴向尺寸小。

但是,滚动轴承尚有下列缺点:

- (1) 大多数类型的轴承径向尺寸过大;

- (2) 在高速、重载荷条件下工作时,寿命短;
- (3) 振动、噪音较大。

近年来随着新材料、制造工艺、润滑及结构设计等诸方面的研究,已使上述不足有了相当大的改善,所以,在各个领域中,滚动轴承得到了广泛使用。

随着工业的发展,对滚动轴承的性能、寿命和可靠性提出了更高的要求。所以,目前在世界范围内正广泛开展着以滚动轴承为主要对象的研究工作,在结构设计、计算理论、试验方法、制造技术、装配技术、材料科学、润滑研究及应用选型设计等方面取得重要进展,使滚动轴承的性能、寿命和可靠性已有大幅度的提高。

滚动轴承优良的性能、寿命和可靠性,不仅仅取决于轴承的设计和制造,而且还取决于应用设计。只有对滚动轴承及其系统的应用进行系统设计,考虑影响滚动轴承可靠性和寿命的各种因素,才能够确保滚动轴承性能的发挥和寿命的提高。可以说,离开了滚动轴承系统的合理选型设计 and 应用就无法考虑轴承的使用寿命。

第二节 滚动轴承选型设计方法

滚动轴承的应用选型是根据工况条件,首先确定滚动轴承工作要求的额定动负荷 C ,然后根据结构要求、类型要求、尺寸要求及额定动负荷要求,在滚动轴承样本中查取所需要的轴承型号。可见,确定工作要求的轴承额定动负荷是滚动轴承选型的基础。

最常用的滚动轴承额定寿命计算式是根据40年前莱特贝格和帕尔姆格林的试验结果建立的,并被世界ISO标准所

采用,其计算式如下:

$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^\epsilon \quad (1-1)$$

并根据式(1-1)得到满足工作要求的轴承额定动负荷计算式,以作为滚动轴承选型的依据,

$$C = P(L)^{1/\epsilon} \quad (1-2)$$

式中: L ——可靠度为90%的额定寿命,百万转;

C ——滚动轴承额定动负荷, N;

P ——滚动轴承承受的当量动负荷, N;

ϵ ——寿命指数,球轴承 $\epsilon = 3$,滚子轴承 $\epsilon = 10/3$ 。

实际计算时一般以小时 h 表示轴承寿命,这时式(1-1),式(1-2)变为:

$$L_h = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P} \right)^\epsilon \quad (1-3)$$

$$C = P(L_h n \times 60/10^6)^{1/\epsilon} \quad (1-4)$$

式中: L_h ——额定寿命, h;

n ——轴承转速, r/min。

但是应当注意,式(1-1)~式(1-4)的使用是有条件的,即轴承疲劳寿命的可靠度为90%,轴承使用普通轴承钢,润滑良好,工作游隙为零,无轴向偏斜,热处理硬度 HRC 58~64,工作温度低于120℃。当条件变化时,计算误差将较大。

近年来,随着科学技术的不断发展,可靠性要求的提高、轴承钢材质量的提高、润滑条件的改进等等,已经不可能再用式(1-1)~式(1-4)描述轴承疲劳寿命与负荷的关系了。通过大量的试验研究,新近引入了寿命修正系数,以考虑可靠性、材料、工况条件对轴承疲劳寿命的影响。国际标准化组织根据已有的研究成果在新的 ISO 标准 ISO281/I-1977(E) 中

通过引入寿命修正系数修订了额定寿命及额定动负荷的计算方法。

新的寿命计算及工作要求的轴承额定动负荷计算式如下：

$$L_{na} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \left(\frac{C}{P} \right)^\epsilon \quad (1-5)$$

$$C = P [L_{na} / (\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3)]^{1/\epsilon} \quad (1-6)$$

式中： L_{na} ——任意使用条件下的寿命，百万转；

其中 n 表示可靠性要求。

α_1 ——对可靠性的寿命修正系数；

α_2 ——对材料的寿命修正系数；

α_3 ——对工作条件的寿命修正系数。

由于材料修正系数 α_2 和工作条件修正系数 α_3 在轴承运转中对使用寿命的影响往往存在不可分割的关系，因此，瑞典 SKF 工程研究中心的研究人员通过试验研究用综合修正系数 α_{23} 代替了 $\alpha_2 \alpha_3$ ，这时式(1-5)变为：

$$L_{na} = \alpha_1 \alpha_{23} \left(\frac{C}{P} \right)^\epsilon \quad (1-7)$$

SKF 工程研究中心的研究人员在最新的研究报告中又用综合反映润滑条件、污染程度、材料的疲劳负荷极限之间复杂关系的系数 α_{SKF} 代替 α_{23} ，以满足试验结果。

$$L_{na} = \alpha_1 \alpha_{SKF} \left(\frac{C}{P} \right)^\epsilon \quad (1-8)$$

美国在 1985 年出版的机械设计与系统手册中也综合考虑了诸寿命影响因素，推出了经修正的寿命计算式：

$$L_A = DEFGH \left(\frac{C}{P} \right)^\epsilon \quad (1-9)$$

式中： L_A ——经修正的额定寿命；

- \bar{D} ——材料系数；
- \bar{E} ——材料冶炼方法系数；
- \bar{F} ——润滑系数；
- \bar{G} ——速度影响系数；
- \bar{H} ——轴向偏斜系数。

如果综合考虑式(1-5)、式(1-9),及近年来对滚动轴承寿命影响因素的新的研究成果,则可以得到如下经修正的寿命计算式:

$$L_{hn} = \left(\frac{10^6}{60n} \right) \left(\frac{C}{f_P P} \right)^\epsilon f_R f_L f_G f_S f_Y f_H f_T f_U f_E \quad (1-10)$$

则

$$C = f_P P \left(\frac{L_{hn} n \times 60}{f_R f_L f_G f_S f_Y f_H f_T f_U f_E} \right)^{1/\epsilon} \quad (1-11)$$

式中: L_{hn} ——任意使用条件下的寿命,其中下标 n 表示可靠性要求;

- n ——轴承转速, r/min ;
- f_P ——载荷系数;
- f_R ——对可靠度的寿命修正系数;
- f_L ——对润滑的寿命修正系数;
- f_G ——对润滑油过滤精度的寿命修正系数;
- f_S ——对润滑油中含水的寿命修正系数;
- f_Y ——对材料熔炼的寿命修正系数;
- f_H ——对材料表面硬度的寿命修正系数;
- f_T ——对温度的寿命修正系数;
- f_U ——对游隙的寿命修正系数;
- f_E ——对轴向偏斜的寿命修正系数。

由于式(1-10)、式(1-11)综合考虑了影响滚动轴承

寿命的各因素,所以,可以得到更符合实际的结果。

由式(1-4)、式(1-6)及式(1-11)可以看出,为了正确确定工作要求的额定动负荷 C 值,必须首先确定滚动轴承设计寿命 L_{hn} (或 L_{na})、实际当量动负荷 P ,及各寿命修正系数。

由于在一个传动系统中,滚动轴承不是单独使用,而是由几个,甚至几十个轴承组成一个系统;作为设计目标,往往也是给定轴承系统的寿命和可靠性,所以,在确定各单元滚动轴承的设计寿命时,应首先分析滚动轴承系统的可靠性与寿命问题。

从以上分析可见,滚动轴承的选型设计涉及到滚动轴承系统的可靠性与寿命分析、实际载荷分析及工况条件分析。

第三节 滚动轴承系统可靠性与寿命问题

作为现代设计法主要内容之一的可靠性设计法,其问世已达30~40年历史,目前,可靠性已是衡量机电产品质量的重要指标。可靠性技术已成为产品质量保证、安全性研究和产品责任预防措施不可缺少的依据和手段。

可靠性其经典定义是:系统或元件在规定时间、规定条件下,保持其规定功能的能力。而作为可靠性定量表达方式的可靠度其定义是:在规定时间、规定条件下,能保持其规定功能的概率,概率越大,可靠性越高。

与常规设计相比,可靠性设计使人们对“强度”这个概念,从零件发生“破坏”或“不破坏”这两个极端准则,改换为

“出现破坏的概率”，或“达到预期寿命要求的概率有多大”，以利于对系统的寿命进行预测，避免整个系统的故障所引起的经济上，甚至生命安全上的极大危害。

通常规定的滚动轴承额定寿命是指一批相同轴承在同样条件下运转，有 90% 的轴承不失效时的总转数；而作为轴承出厂的重要指标：滚动轴承额定动载荷 C 值，则为一批相同轴承使承受这一载荷进行运转，其额定寿命为 100 万转次，它的不失效概率应为 90%。但是，如果失效概率增大或者减小，则滚动轴承的使用寿命均将产生变化。

随着科学技术的发展，提高了工程设计中对产品的可靠性与寿命的要求，在大多数滚动轴承应用的场合，往往要求设计寿命的可靠度指标大于 90%。特别是更多的场合是对滚动轴承系统提出了寿命与可靠度要求，因此，就需要分析滚动轴承系统及组成系统各轴承的可靠性与寿命的关系。

众所周知，使用滚动轴承的目的是支承加于轴上的载荷，所以，滚动轴承很少单独使用，而是由二个或更多的滚动轴承组成一个支承系统，以达到某种工作需要，而工作中往往任何一个轴承的损坏都将导致支承系统的损坏。所以，在滚动轴承的应用设计中，不能单纯从各个分离的滚动轴承入手进行应用设计，而应该把组成系统的各个轴承视为一个整体，对滚动轴承系统的应用进行设计。

对于滚动轴承系统来讲，由于有一个轴承发生故障或失效，就将使整个系统发生故障，故滚动轴承系统属串联系统，其系统可靠度将低于组成系统的各轴承的可靠度。假定有一个由 10 个滚动轴承组成的滚动轴承系统，设定每个滚动轴承的可靠度为 90%，则按串联性质，系统的可靠度将介于 0.35 ~ 0.9 之间，可见系统发生损坏的概率很高，这在实际应用中

是不允许的。所以，在滚动轴承系统的应用设计时，必须充分考虑滚动轴承系统的可靠性与寿命要求，从系统要求出发展开滚动轴承的应用设计。

第四节 影响滚动轴承寿命的因素

在滚动轴承系统的应用选型设计中，所要达到的目的是满足系统的可靠性与寿命要求。但是，在实际应用中，滚动轴承的承载能力和使用寿命受到很多因素的影响，如果在滚动轴承的应用设计中，对各种因素考虑不周，就将降低其实际使用寿命。

一、滚动轴承的失效及原因

在一般机械设备的传动系统中，由于滚动轴承的损坏而造成整个传动系统的损坏所占的比例很大。

滚动轴承的失效形式很多，其基本类型可分为：

(1) 磨损：包括磨粒磨损，点蚀与剥落，微动磨损，胶合，擦伤等。

(2) 开裂与断裂：包括内、外圈开裂及滚动体碎裂。

(3) 压痕。

(4) 腐蚀与腐蚀磨损。

(5) 电蚀。

(6) 不允许的旋转爬行。

由于滚动轴承的结构和使用特点，决定了其失效的因素多而复杂，但是，可以归纳为以下几个主要方面：

(1) 装配不良。如装配过紧、过松及轴线歪斜等。

(2) 润滑不良。如润滑剂选用不当，供给量不当等。

(3) 严重过载或冲击、振动。

(4) 环境条件恶劣。如温度过高或过低,外在磨料侵入等。

(5) 材质或制造精度不良等,包括配合件的制造精度。

表 1-1 列出了滚动轴承常见的失效形式及原因。

表 1-1 滚动轴承常见的失效形式及原因

形式	序号	特 征	原 因
磨 粒 磨 损	1	滚道表面无光泽	轴承中有粗糙研磨物
	2	滚道表面光亮带	轴承有细小研磨物
	3	滚动体磨损痕迹不规则	研磨造成的振动
	4	滚道、滚动体上与保持架接触部位磨损	有惯性力作用于保持架上,或润滑不足
	5	滚珠保持架磨损	内或外圈不正,轴承内部有研磨物
	6	滚道表面和滚动体磨损引起的内部松动	润滑不良,以及过滤不良导致残剩研磨物
剥 落 和 点 蚀	1	环绕整个滚道的剥落	因过载、内圈膨胀或外圈收缩而使间隙不当,导致扩展型疲劳剥落
	2	向心轴承在径向两个相对点上的剥落	装配内、外圈时,因配合件不圆,使内外圈畸变(呈椭圆形)
	3	仅在滚道表面一侧的剥落	装配不当或轴承载荷过大
	4	在滚子(滚柱)滚道一端的剥落	内、外圈不对中(滚子轴承)
	5	与滚动体等距离分布的剥落	伴有光滑压痕时,是由过载压痕所致;伴有粗糙压痕时,是有微动磨损所致
	6	转动轴滚道上的倾斜剥落	轴承不对中或挠曲,内、外圈不正
	7	静止轴滚道上的倾斜剥落	轴挠曲或内、外圈不正
	8	滚动体上的剥落	强力安装、过载或润滑不足
	9	推力轴承滚道上偏心分布的点蚀坑	装配偏心或加载偏心