

提高气流纺高速轴承的寿命和可靠性

张铮铮

(上海纺织轴承一厂)

一、引言

1967年气流纺投入生产,当时纺杯转速为3万转/分。经过几年之后,通过世界各国科研人员努力,转速提高到6万转/分。高速转子研究之所以引起重视,理由有两方面:

1. 经济性 在相同的纺纱条件下,主机生产率随转子转速的提高而按比例增加,可以提高劳动生产率,降低成本,取得较大的经济效益。

2. 技术性 适纺支数扩大,经济支数提高,主机的适应性也随之扩大。

直接传动的高速轴承,因其系统简单,工作可靠,目前国际上三十多种机型的气流纺机,仍以采用此种型式为主,本文研究的就是提高直接传动轴承的寿命和可靠性。

从摩擦学观点看世界上各种机械,30%的能量消耗于回转部件的摩擦^[1],30%的材料消耗于回转部件的磨损。纺织机械的特点是每台机器回转部件的数量远多于其他机械,纺纱工艺所消耗的能量甚少,在纺织机械中,回转件摩擦损失约占总功率的85%,而回转件的磨损仅达几克。因为不适应工艺要求,致使部件失效而报废的钢材,千万倍于其磨损量。故提高轴承的寿命和可靠性,不仅是发展气流纺新技术的先决条件,而且也是节约能量、节约钢材的重要方面。

二、滚动轴承的功能可靠性^[2]

1. 寿命离散

理论与实践证明,同一批轴承的寿命,不

仅是一个数值,也是一种分布。离散的规律一般遵循 Weibull 函数^[3],其数学式如下:

$$F = 1 - \exp \left[-0.105 \left(\frac{L - L_0}{L_{10} - L_0} \right)^\beta \right] \quad (1)$$

式中: L 为轴承寿命,以运转时间百万转或小时计; F 为一套轴承达不到给定寿命 L 的概率; L_{10} 为额定寿命,是指同一批轴承,其中90%的轴承在疲劳剥落前能够达到或超过的总转数,或在一定转速下的工作小时数; L_0 为所有轴承均能达到的最低寿命,一般取 $L_0 = 0$ 或 $0.05 L_{10}$; e 为自然对数底,等于2.72; β 为离散指数,对滚动轴承一般取 $\beta = 1.11$ 。

可靠性 S (指一套轴承能达到或超过给定寿命 L 的概率)与 F 的关系如下式所示。

$$S = 1 - F \quad (2)$$

将式(1)代入式(2),得

$$\begin{aligned} S &= \exp \left[-0.105 \left(\frac{L - L_0}{L_{10} - L_0} \right)^\beta \right] \\ &= \exp \left[-\ln \frac{1}{0.9} \left(\frac{L - 0.05 L_{10}}{L_{10} - 0.05 L_{10}} \right)^{1.11} \right] \end{aligned}$$

上式两边取对数,得

$$\ln S = - \left(\ln \frac{1}{0.9} \right) \left(\frac{L - 0.05 L_{10}}{0.95 L_{10}} \right)^{1.11}$$

移项,得

$$\begin{aligned} \frac{L - 0.05 L_{10}}{0.95 L_{10}} &= - \left(\frac{\ln S}{\ln \frac{1}{0.9}} \right)^{0.9} \\ \frac{L}{L_{10}} &= 0.95 \left(\frac{\ln S}{\ln \frac{1}{0.9}} \right)^{0.9} + 0.05 \quad (3) \end{aligned}$$

用式(3)可计算在任何概率条件下(即可靠性)的轴承寿命,并可对要求高可靠性的轴承系统进行估算。

2. 破坏密度 Z(L)

对拥有大量锭子、转子或其他回转件的纺织机械来说,估算运转一个时期后的轴承损坏率,预测失效间隔时间(MTBF),制订维修调换计划,无论在技术上或经济上,均具有重要意义。

要对破坏密度下定义,首先要对概率密度 $f(L)$ 下定义:

$$f(L) = dF/dL \quad (4)$$

概率密度 $f(L)$ 是离散函数 F 对运转时间 L 的导数,表示在运转 L 时间后,再继续运转单位时间内破坏概率的变化量。破坏密度 $Z(L)$ 则可以下式表示。

$$Z(L) = f(L)/(1 - F) \quad (5)$$

其定义为:运转 L 时间后,在单位时间内将要疲劳破坏的轴承数与剩余仍在继续运转的轴承数之比。

从(1)、(4)两式得

$$f(L) = \frac{dF}{dL} = 0.105 \beta \left(\frac{L - L_0}{L_{10} - L_0} \right)^{\beta-1} \cdot \exp \left[-0.105 \left(\frac{L - L_0}{L_{10} - L_0} \right)^\beta \right] \cdot \frac{1}{L_{10} - L_0}$$

$$\text{则 } Z(L) = \frac{f(L)}{1 - F} = 0.105 \beta \left(\frac{L - L_0}{L_{10} - L_0} \right)^{\beta-1} \cdot \frac{1}{L_{10} - L_0} \quad (6)$$

对一套轴承而言,破坏密度表示轴承已运转 L 时间后,如再运转单位时间,该轴承将要破坏的概率。

若 N 表示每台纺纱机同类轴承数,则整台纺纱机在运转 L 时间后,再继续运转单位时间,轴承将要疲劳破坏的总数 N_F 为:

$$N_F = Z(L) \cdot N \text{ 或}$$

$$N_F = 0.105 \beta \left(\frac{L - L_0}{L_{10} - L_0} \right)^{\beta-1} \cdot \frac{1}{L_{10} - L_0} \cdot N \quad (7)$$

3. 提高轴承的可靠性

ZQ1A型气流纺高速轴承,系无内圈、分离型带预加负荷的球轴承结构型式,呈X

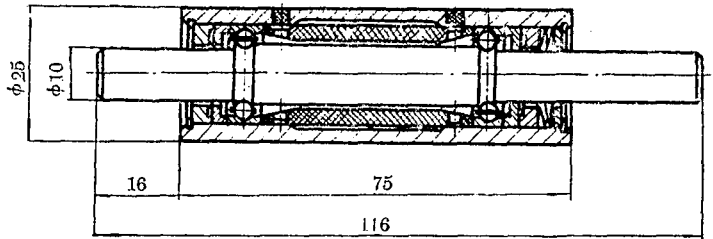


图1 ZQ1A 高速轴承

形排列(见图1)。

几年来,主要从两方面开展工作,以提高ZQ1A轴承的寿命与可靠性。

(1)在技术上,用摩擦学(Tribology)原理改进设计,提高制造精度,减少磨损,提高寿命。

(2)在管理上,用TQC方法,改善表面质量,推行两个100%(100%轴承试转,100%轴承测温),以提高产品的可靠性。

采用了以上两方法后,使ZQ1A的上机筛去率由25%下降到1%,3600小时后的损坏率由32.7%下降到2%,大大提高了轴承的寿命和可靠性。

三、具体采取的措施

1. 系统分析,改进设计

ZQ1A属小型高速轴承,高速运转时,即使 Dn 值相等(D 为轴承节径, n 为轴承转速),钢球单位容量的离心力 CF/d^2 (CF 为钢球离心力, d 为球径)远大于大轴承^[3]。故对小轴承的几何形状和其他参数必须精心设计,以减少高速时的离心力,避免钢球打滑及发热。根据这些分析,可采取下列措施。

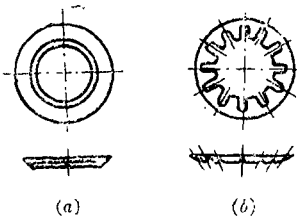
(1)滚动体设计:减小球径,增加球数。球径选用 $\phi 3.175$ 毫米,比现有气流纺高速轴承的球径都小;球数定为9粒,比现有气流纺的高速轴承的球数都多。

(2)芯轴沟曲率加大:芯轴沟曲率比值,即沟曲率半径与钢球直径之比,由0.52加大到0.56,改善在高速时钢球的受控情况。这样轴承额定动载荷有所下降,但可改善高速

性能,得大于失,从系统分析看还是可取的。

(3) 保持架材料改进:将原用的尼龙保持架改为酚醛保持架,增加强度。

(4) 预加负荷:ZQ1A 轴承采用碟形弹簧,施加轴向负荷,消除系统间隙,稳定高速时钢球的运动。原采用整体式碟形弹簧(图 2a),现在则改进为齿式碟形弹簧(图 2b)。从图 3 中可以看出,在预紧力相同的条件下,轴向补偿量大为增加,这样从根本上解决了由于轴向补偿量太小,运转不久轴向松动、钢球失控而使轴承损坏等弊病,大大提高了轴承的可靠性。



a 整体式碟形弹簧 b 齿式碟形弹簧

图 2 两种碟形弹簧

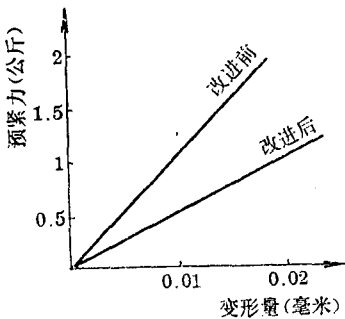


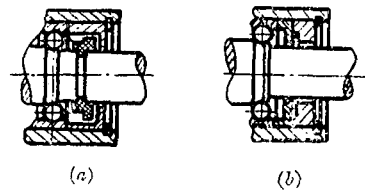
图 3 预紧力和变形量关系

2. 润滑和密封的改进

弹性流体动力润滑(EHL)理论指出,提高油膜参数 Λ ($\Lambda = h/\sqrt{S_1^2 + S_2^2}$). 式中: h 为油膜厚度, S_1 、 S_2 为两相互作用表面的粗糙度,可延长轴承寿命,提高轴承可靠性。它涉及轴承结构、加工、装配、润滑剂选用、加油量和加油周期等因素。

(1) 结构:①油路:外壳左右各有一加油孔,与隔离套两槽对齐,槽上开有 180° 两个

小孔,用定量加油枪自两孔注入,可使润滑脂直接进入轴接触区(见图 1)。②密封:轴承密封起不使油脂外溢和不使尘埃飞花侵入的双重作用,是保证高速稳定运转的重要因素。原设计在旋转芯轴上加装尼龙圈和顶紧帽组成的迷宫式,如图 4a 所示。存在的问题是由于气流影响,带盘端尘埃飞花仍易侵入,且塑料件颇多毛刺,长期运转与油脂混和,造成轴和轴承磨损。现改为聚四氟乙烯薄膜固定式密封(图 4b),提高了密封效果。



a 尼龙圈迷宫式 b 聚四氟乙烯薄膜固定式

图 4 两种密封图

(2) 加工:从 $\Lambda = h/\sqrt{S_1^2 + S_2^2}$ 公式中可看出,减小表面粗糙度(S_1 、 S_2),可提高油膜参数 Λ ,从而提高轴承寿命与可靠性。具体到气流纺高速轴承,就是要使零件沟道和钢球表面光洁度提高。在终磨工序采用橡胶细粒度砂轮,使磨削粗糙度从 $Ra 0.32\mu m$ 减小到 $0.16\mu m$,然后采用粗精二道油石超精研,使成品表面光洁度达到 $Ra 0.04\mu m$,降低了 S ,提高了 Λ 。

(3) 超声波清洗净化装配:SKF 工业研究所研究报告曾指出,轴承寿命(L_{10})取决于两个相互作用表面间的油膜厚度,若金属表面接触,则将导致磨损。最近该所研究工作又表明轴承寿命在很大程度上取决于润滑剂的洁净程度,洁净度高,轴承寿命可成倍提高。在制造过程中,油脂的沾污往往是工件在清洗、装配工序中造成的。特别是经研磨或超精研的零件,微小的研磨膏、砂粒、金属末嵌入零件表面峰谷之间,用一般清洗方法很难清除。现采用 CSF-3A 型超声波清洗机(功率 500 瓦,频率 17.5 千周),取得良好

的清洗效果。清洗烘干后的零件,进入净化室进行装配。净化级别按美国联邦标准 100 级,尘埃粒径 $\leq 0.5\mu\text{m}$,室内保持 0.8 毫米水柱正压。带纤维的衣服、用具等严禁入室,装配后进行精密动平衡 $e \leq 0.4\mu\text{m}$ 。这样做,大大改善了轴承的高速性能,提高了轴承寿命与可靠性。

(4) 润滑脂的选用和加油量:多年实践证明,36000 转/分轴承可采用国产 7007 特种航空脂。气流纺轴承工作转速与极限转速之比约为 0.6,注油量以一次注入 0.6 克为宜。当轴承转速为 3 万转/分时,加油周期为 3500 小时,转速为 4 万转/分时,加油周期为 2000 小时。

3. 加强管理

要保证小批试制与大量生产产品质量的一致性,要保持这一时期与下一时期生产的稳定性,推行 TQC 管理方法是一项有效的措施。这里重点提一下推行两个 100% 的问题。

(1) 100% 产品试转:尽管在设计、制造、装配、检测四方面严加控制,高速轴承出厂前的试转,还是一道不可缺少的重要工序。很多综合性问题(主要是产品可靠性)在前工序反映不出,可从试运转中反映出来。分析这些问题,对改进产品性能很有帮助。从 1979 年 10 月份起规定,凡出厂产品都需在模拟生产现场的试转机上试转^[5],对改进产品质量起了促进作用,出厂后的上机筛去率由 25% 下降到 1%。

(2) 100% 产品测温:温升是综合反映轴承高速性能情况的主要指标之一。轴承在 36000 转/分条件下运转 1.5 小时后,以半导体点温计测温,温升 $\leq 15^\circ\text{C}$,并逐套予以记录,计算 \bar{X} 、 σ 、 R 、 T_{max} 和 T_{min} ,进行分析改进^[6]。

(3) 在有关使用单位建立高速轴承失效分析。

四、计算与实测

为深入研究轴承可靠性,从 1979 年 10 月起,先后在上棉十四厂、上棉二十二厂建立了现场失效分析。今将理论计算与现场实测数据比较于后。

1. 计算

一台 SQ1 气流纺纱机拥有 200 套纺杯轴承,在 36000 转/分条件下,轴承额定寿命 $L_{10} = 3$ 年,则 $L_0 = 0.05$, $L_{10} = 0.05 \times 3 = 0.15$ 年,代入式(7)得:

$$N_F = 8.48[(L - 0.15)/2.75]^{0.11};$$

根据上式,以不同 L 值代入,算出 N_F 列于表 1。

表 1 运转时间与轴承损坏数对照表

运转时间(年)	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.0
每年每台车轴承损坏数(套)	0	5	6	7	7	7	7	7	7	7

2. 实测

在上棉二十二厂,36 号车(机型 SQ1) 36000 转/分条件下,运转一年后的现场损坏数列于表 2。

表 2 运转一年中轴承的实际损坏数

运转时间(年)	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.0
每台车当日损坏数	1	2	1	1	0	3	0	0	0	4
每台车累计损坏数	1	3	4	5	5	8	8	8	8	12

3. 对比

今将表 1、2 绘成图形,并将改进前轴承损坏数也列出进行对比(见图 5)。

五、结 论

提高轴承寿命与可靠性,是提高气流纺主机经济性的关键。在我国,研究纺织轴承可靠性还刚刚开始,通过研究认为,从以下几方面进行工作是可以提高轴承寿命与可靠性的。

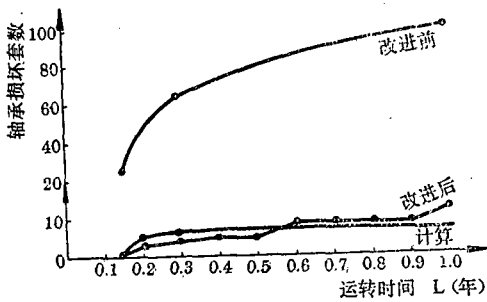


图5 轴承损坏统计对比图

注：1. 改进前轴承运转3600小时后的损坏数高达65套，显然轴承在高速运转时完全处于失控状态。2. 改进后轴承的可靠性大大提高，在上车半年内，实际损坏数略低于计算值；而运转半年以后，实际损坏数略高于计算值。总的情况是实测值和计算值颇为接近。

1. 在技术上从轴承结构、润滑、表面质量三方面加以改进，具体有以下几点：

- (1) 改进预荷设计，控制钢球高速运转状态。
- (2) 正确选用保持架材料，提高保持架精度。
- (3) 改进密封时要考虑纺杯轴承受气流影响的特殊情况。
- (4) 减少磨削力和磨削热，减少振源，提高关键件的表面（在相对运动中相互作用的表面）质量。
- (5) 使用超声波清洗，净化装配。
- (6) 进行精密动平衡 $e = 0.4\mu m$ 校验。

2. 在管理上应用TQC方法，控制质量，保证可靠性，具体有以下几点：

- (1) 100%产品在模拟试转机上试转。
- (2) 100%产品测温，建立属性控制图，温升 $\leq 15^\circ C$ 。
- (3) 在生产现场建立损坏率记录，定期进行实物分析。

参 考 资 料

[1] Horst Czichos, Tribology, 1978, P.11—51.
 [2] G.Bergling, "The Operational Reliability of Rolling Bearings", Ball Bearing Journal, 188, P.1. 1976,
 [3] "Manufacturing Engineering", PartI/PartII,

Oct/Nov, P.59/P.44. 1977,
 [4] Heinz Hanau, Stanley Abramovitz: "New Concepts in Bearing Design and Applications". P:47. 1978,
 [5] "Industrial Lubrication and Tribology", sept/oct P.176. 1980,
 [6] Everette Adam, Ronard J.Ebert: "Production and Operations Management", 1978.



各地学会动态

上海——召开第四届会员代表大会

上海市纺织工程学会第四届会员代表大会，于1982年6月16~17日召开。出席会议的有会员代表、三届理事会理事和各单位及纺织界老前辈等各方面来宾共三百多人。

会议首先由三届理事会报告工作情况，接着三届理事长纺织部副部长何正璋同志和上海市科协代表讲话，纺织界老前辈李升伯先生也在会上作了热情的发言。

17日上午，上海纺织局局长张惠发向大会作关于当前纺织工业形势的报告，陆国贤副局长作了访日考察的报告。下午到会代表选举了四届理事87人，通过了“学会修改章程”和代表大会决议。

7月2日，第四届理事会举行首次理事会议，选举出新的领导班子常务理事31人及正副理事长、正副秘书长等，由陆国贤副局长任理事长，並公推苏延宾同志为名誉理事长，副理长八人。又决定聘任顾问20人，华东纺织工学院钱宝钧院长为首席顾问。会上由副理事长兼秘书长蔡黎明同志向全体理事作了关于以后学会工作的打算，主要有以下几点：

一、适应纺织新形势需要，针对纺织品市场新情况，围绕品种开发、提高质量、技术改造、提高经济效益等方面开展学术活动，有下列几个方面：

1. 重视调查研究，加强科技情报。
2. 组织技术攻关，如梳棉机产量问题等。
3. 针对技术课题，组织研究，如织机改造方向。
4. 抓好经验交流。

二、加强组织工作

1. 在基层单位建立会员小组，整顿和建立联络员制度，加强学会与会员的联系。
2. 要求各专业学术委员会拟订好学术活动计划，做好学术活动内容和时间的预报工作，使会员能先期了解活动内容，便于安排参加。