

油气润滑技术在电主轴系统中的应用试验分析

张岩¹, 苟卫东²

(1: 青海大学机械工程学院, 西宁, 810016; 2: 青海一机数控机床有限责任公司, 西宁, 810016,)

摘要: 为了使电主轴高速可靠运行, 主轴的润滑方式起到了决定性作用。由于油气润滑在高速电主轴润滑中的优越性, 使其成为理想的润滑方式并为电主轴润滑方式的首选。本文以油气润滑技术在电主轴系统上的实际应用为例, 通过搭建试验平台来证明和阐述油气润滑技术在电主轴系统应用上的优越性。

关键词: 油气润滑 电主轴 试验平台 试验分析

Experimental analysis of oil-air lubrication technology in motorized spindle system

Zhang Yan, Gou Wei-dong

(1: Mechanical Engineering Department of Qinghai University, Xining, 810016, China; 2: Qinghai No.1

NC Machine Tool Co., Ltd., Xining, 810016, China)

Abstract: In order to make the motorized spindle speed and reliable operation, the shaft of lubricating way played a decisive role. In the high speed motorized spindle lubrication, the oil-air lubrication is the most ideal method of lubrication and the superiority of their lubrication become the preferred mode of motorized spindle lubrication. In this article, through the oil-air lubrication technology in direct-drive spindle system of practical application and building the experiment platform, the author expound and proof of the superiority of oil-air lubrication technology in motorized spindle system.

Key words: Oil—air lubrication; Motorized spindle; Test platform; Experimental analysis

1 引言

现如今随着制造加工技术的飞速发展, 数控机床的效率越来越高, 其电主轴的转速也达到了相当高的水平。电主轴之所以能达到这么高的速度并能高效、高精度的运行, 油气润滑技术起到了关键性作用。数控机床主轴提高转速的核心问题就在于主轴的润滑, 而油气润滑系统则可满足主轴实现高速旋转要求。油气润滑系统远比普通的油或者油脂润滑方法优越, 不但能满足主轴高速旋转的要求, 同时还能限制油温的上升及动力的消耗量。在此我们通过搭建试验平台来研究和证明油气润滑技术在电主轴系统中的优越性。

2 油气润滑系统的原理

油气润滑系统就是利用压缩空气在管道内的流动, 带动润滑油沿管道内壁不断流动, 把油气混合物输送到润滑点。压缩空气以恒定的压力连续不断地供给, 而润滑油则是根据各个不同磨擦点的消耗量定量供给。使用油泵作为输油的动力来源, 采用步进式给油器在进入润滑点前先进入油气混合器。油气润滑系统中, 油和气混合装置工作原理如图 1 所示。在油气

混合器里，流动的压缩气体把油吹成油滴，附着在管壁上形成油膜。油膜随着气流方向沿管壁流动，在流动过程中油膜层的厚度逐渐减薄，并不间断供油。

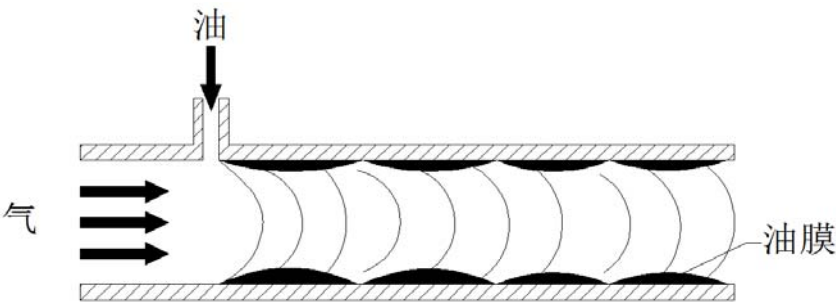
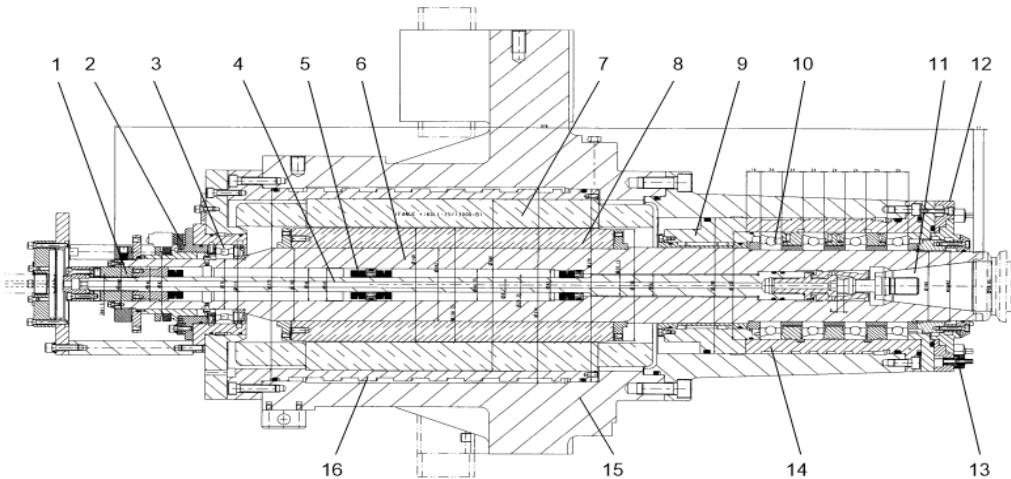


图1 油气混装置工作原理图

间隔时间和每次的供油量可以根据实际消耗的需要量进行调节。沿管壁连续流动的油膜到达润滑点后，在摩擦副表面形成油膜，隔绝相互摩擦的表面，使干摩擦状态转变为液体摩擦状态或准液体摩擦状态；流动的压缩空气可以冷却摩擦副，带走热量，阻止润滑油高温碳化。同时压缩空气使摩擦副腔内形成正压，可避免外部环境中的杂质和腐蚀流体侵入摩擦副，保证摩擦副有良好的工作环境。

3 电主轴系统上的应用

3.1 电主轴系统简介



1-液压缸； 2-进油口； 3-后陶瓷滚子轴承； 4-拉杆； 5-蝶形弹簧； 6-主轴； 7-定子； 8-转子； 9-定位套； 10-前陶瓷球轴承； 11-主轴锥孔； 12-轴承套； 13-冷却液喷头； 14-前轴承冷却油套； 15-电主轴壳体； 16-定子油套。

图2 电主轴系统示意图

电主轴是将机床主轴与电机融为一体的新技术。图2为电主轴系统示意图,它是一套组件,电动机内置于主轴部件内,通过变频器类的驱动器,以实现主轴转速的变换。随着电主轴在不断地向高速化方向发展,电主轴轴承的润滑冷却对实现电主轴的高速化具有极其重要的

作用。只有选择合理的润滑方式、正确使用润滑剂、恰当地控制润滑剂用量,才能有效地降低温升,减少主轴的热变形,延长电主轴使用寿命。

3.2 油路及供油方式的确定

由于油气润滑所需润滑剂的量少但却能达到理想的润滑状态,所以必须严格设计油和供油方式。电主轴常用轻系列的角接触球轴承,其供油最佳方式是从一边进入轴承内部的,如图 3a 所示。油气喷嘴孔与内圈齐平,但是实际应用中由于尺寸的限制常采用图 3b 的结构。在油路设计中需尽量避免管子截面的变化,尽量减少油路弯折,如结构有所限制,应尽量保持变化部位的光滑过渡。同时,一定要保证油气出口的畅通。

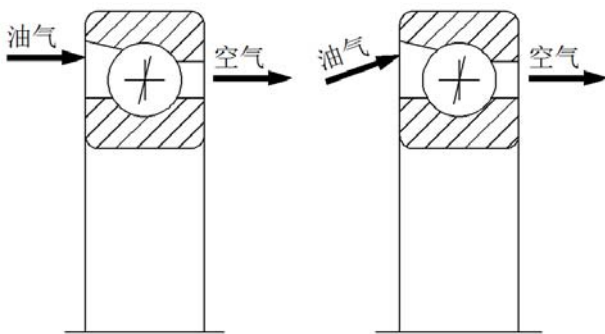


图 a

图 b

图 3 主轴轴承供油方式

3.3 油气润滑系统的状态监视

油气润滑系统中有三种介质即油、气和油气,系统与之对应的三个部分即供油、供气及油气输送部分一旦出现故障,电主轴就无法得到正常的润滑甚至损坏。因此电主轴中一套完善的油气润滑系统应具备对这三种介质的监视功能,从而确保知悉系统所有部分的运行状态,一旦故障发生时能及时发出故障信号,避免电主轴出现严重的后果。

油气润滑系统能确保对三种介质的状态都进行监视:

1) 对油的监视: 液位开关监视油箱液位, 确保液位过低时系统停止运行; 递进式分配器的接近开关监视递进式分配器本身及其上游的供油部件如泵等工作有否故障, 整个供油过程是否正常。

2) 对气的监视: 一个或数个压力开关监视压缩空气的压力状况。

3) 对油气的监视: 是油气流量监控装置。对油气的监视有两种方式, 一种是只监视油气流量的下限值, 即油气流量过低并低于某个设定值, 油气流量过低意味着油气流动速度过慢或停止, 润滑剂无法被正常供送到润滑点; 还有一种是不仅监视油气流量的下限值, 还同时监视油气流量的上限值, 即由于油气管道破损或泄漏导致油气大量外逸。

3.4 油气润滑系统的计算

第一步：确定轴承需油量；

对于轴承供油量，FAG 公司给出了摩擦转矩和双列圆柱滚子轴承的温升与所需润滑油量的定性关系，如图 5 所示。

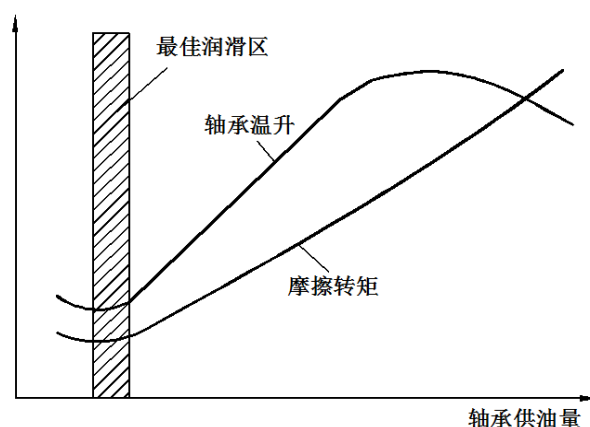


图 4 轴承温升摩擦转矩与供油量的关系

从图 4 中可以看出，使摩擦转矩和轴承温度达到最佳数值时所需的油量是比较少的。过多的润滑油只能增加轴承的搅油损耗而使轴承温升增大。图中阴影部分为最佳供油区域。因此计算出油气系统中润滑油的供应量是很有必要的。有文献介绍，可以用以下公式近似计算轴承所需要的润滑油用量。

$$Q = W \cdot d \cdot B$$

式中 Q ——供油量，3mm/h

W ——系数，0.01mm/h

d ——轴承内径，mm

B ——轴承宽度，mm

第二步：根据所有轴承的给油情况，确定每个分配器给油点规格；

事实上，这一步也可以看作是确定整个润滑系统的工作制度。我们知道，单线式润滑系统的工作特点是由给油阶段和卸荷阶段构成的。给油时间一般设置在 30~60 秒之间，根据系统润滑点数量的多少不同，在现场通过 PLC 调节；间隔时间的确定也可以现场通过 PLC 进行调节，但是要注意的一点是：对于润滑工作而言，最佳的工作制度应该是“少食多餐”制，即每次减少给油量，适当增加给油次数。这一点也同样适用于其他类型的润滑系统。一般间隔时间在 1~2 分钟之间。

第三步：根据主机轴承分布情况，确定润滑点分组方案；

在这一步骤中的轴承分组其实就是确定如何在现场配管中确定分配器的安装情况以及每件分配器的润滑点数量。以便后续设计以及安装阶段工作顺利进行。在这一步中，按照传统的双线式分配器润滑系统的分配器安排方式进行油气混合块的配置是没有大的区别的。只不过一条管路是油管，另一条管路换成压缩空气管路而已。

第四步：压缩空气耗气量的计算；

油气润滑系统的一个基本因素就是需要有压缩空气气源的供应。这往往是限制油气润滑系统应用的一个主要因素。因为在很多情况下现场是没有办法使用压缩空气的；或者投入一套压缩空气气源装置需要很大的投资。因此准确计算一套油气润滑系统所需要的压缩空气量是十分必要的。

油气润滑系统压缩空气量的计算按照以下方式进行计算：

每点压缩空气消耗量为 30L/min；在此基础上设计压缩空气管路系统以及气源处理元件的规格。本系统中所有润滑点总数为 5 点，则系统总耗气量为 $5 \times 30 = 150\text{L/min}$ 。

第五步：油路系统的总体设计；

根据系统总耗油量的计算结果，确定系统管路通径以及压力等级及泵装置规格。

4 高速主轴油气润滑试验

4.1 试验台组成

试验台组成原理图如下图 5a 所示，并附上试验台实体图如图 5b 所示。

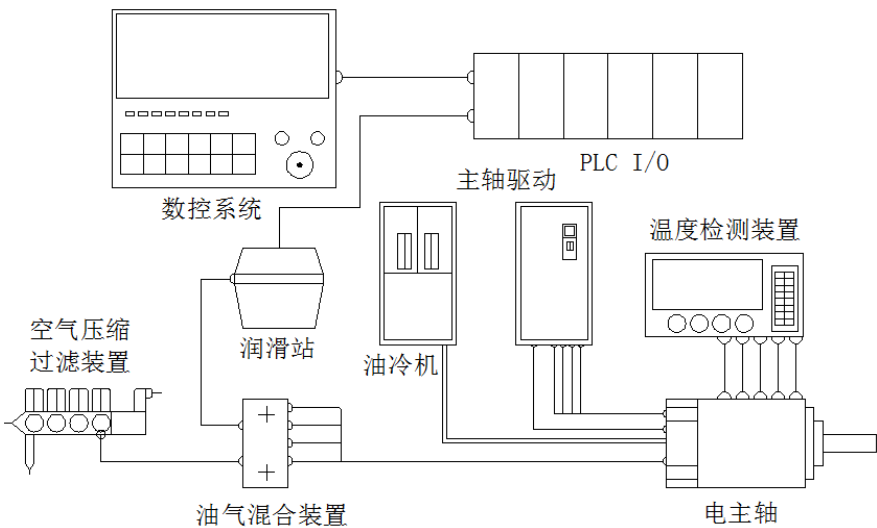


图 5a 试验台原理图



图 5b 试验台实体图

4.2 试验原理与目标

主轴单元的发热和温升是一个动态过程。当主轴在不同的负荷率、不同的转速下运转时，主轴的发热和温升是有所不同的。负荷率越大、转速越高，发热量越大，温升也越明显。为此，做主轴转速为 1000 r/min~15000 r/min 时，轴承的温度测试动态试验。在主轴用油气润滑充分的情况下，对高速卧式加工中心主轴单元进行温度测试，根据温度测试数据，拟合出主轴前后轴承的温度变化曲线，测试温度与时间、转速的关系，进而证明油气润滑对主轴温度升高有明显的抑制作用，并为主轴的油气润滑技术提出应用措施，实现对主轴的温度控制，提高高速机床的加工精度。

试验目标如下：

- (1) 测定主轴前后轴承及进出油口在主轴转速为 1000r/min—15000r/min 时的温度。
- (2) 测试转速上升的温升曲线；得出温度与时间、转速的关系图。

4.3 温度传感器布置方案设计

结合电主轴结构特点，由于热电偶具有构造简单、适用温度范围广、使用方便、承受热、机械冲击能力强以及响应速度快等特点，常用于高温区域、振动冲击大等恶劣环境以及适合于微小结构测温场合，所以本试验采用热电偶传感器对电主轴轴承温度进行测试。

测温点布置：前轴承3个，后轴承1个（即每个轴承外圈处主轴外壁上打孔，安装热电偶，尽量接近轴承外圈）。在此附上本试验台所用的陶瓷轴承型号，如下表1所示。

陶瓷轴承参数表 1

轴承参数	前轴承	后轴承
型号	5S-2LA-HSE020CDTBTCS11P4	N1014HSRT6KCONAP4
内径 <i>mm</i>	100	70
外径 <i>mm</i>	150	110

宽度 mm	24	20
接触角	15°	
滚动体个数	28	20
滚动体直径 mm	11.112	
极限转速 r/min	16900(油润滑)	24700(油润滑)
额定动载荷 kN	33.5	29.2
额定静载荷 kN	35	37.5

用热电偶对电主轴轴承温度测试时，需要对热电偶进行固定，并保证热电偶探头与轴承直接接触。因此设计出由热电偶、密封细牙丝堵、O 型密封圈组成的热电偶传感器固定装置。前轴承热电偶固定装置如图 8 所示。后轴承热电偶固定装置如图 9 所示。

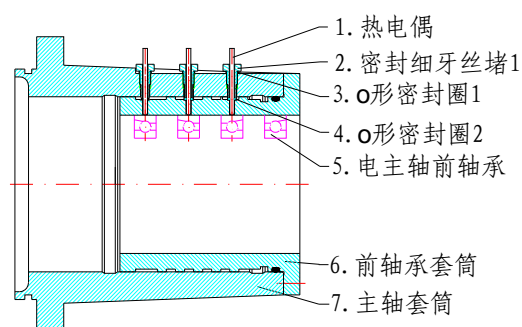


图 6-a 前轴承热电偶固定装置

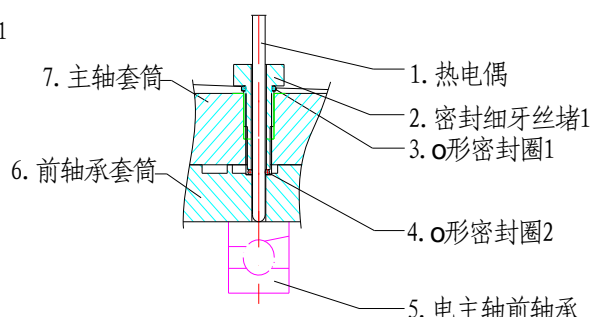


图 6-b 前轴承热电偶固定装置局部放大图

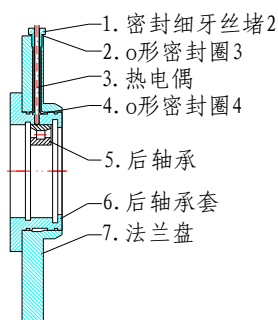


图 7-a 后轴承热电偶固定装置

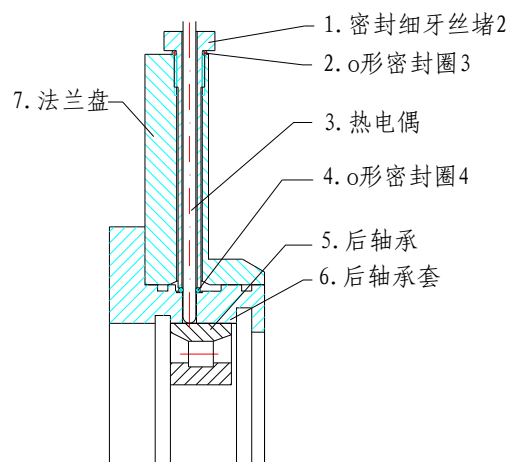


图 7-b 后轴承热电偶固定装置局部放大图

如图 8.1、8.2 所示，由于热电偶要贯穿轴承套的轴承冷却槽，为了防止冷却液溢出，热电偶固定装置应具有很好的密封性能。本试验台设计的热电偶固定装置，采用为 O 型密封圈对固定装置进行密封，以前轴承热电偶固定装置为例，为了防止冷却液溢出电主轴外表面，密封细牙丝堵 1 与在主轴套筒配合时，为 O 型密封圈 1 靠密封细牙丝堵 1 的压紧力，密封主轴套筒与密封细牙丝堵 1 的间隙；轴承是电主轴的关键零件，在对轴承温度测试时，为了避

免冷却液溢出到轴承表面，为 O 型密封圈 2 套在热电偶上，靠密封细牙丝堵 1 端面对 O 型密封圈 2 压紧力，来密封前轴承套筒与热电偶传感器之间的间隙，起到良好的密封作用。

由于受到电主轴单元结构的限制，未对靠近主轴前端的第一个轴承进行温升测试。

4.4 试验装置

电主轴轴承温度测试系统由前轴承温度测试装置（如图 8a、8b 所示），其中 1、2、3 分别表示前轴承 2、前轴承 3、前轴承 4 热电偶传感器的安装位置，前轴承 1 由于电主轴单元结构限制，无法对其测试和后轴承温度测试装置（如图 8c 所示），其中 1 为后轴承热电偶传感器安装位置）两部分组成，进出油口温度的测试如图 8d 所示。



图 8a 温度传感器

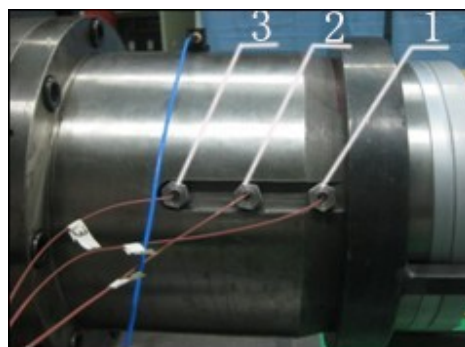


图 8b 前轴承温度传感器的安装

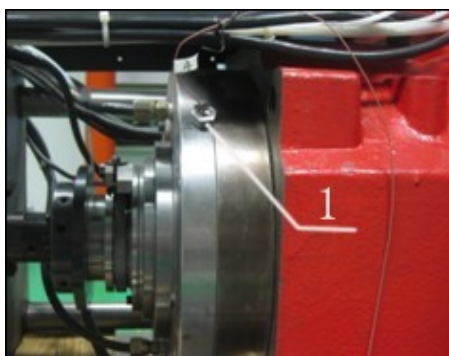


图 8c 后轴承温度传感器的安装



图 8d 进出油口温度测试

4.5 试验步骤

实验环境：主轴室室温 25℃，冷机 23.5℃

试验具体方法步骤：

（1）分别在主轴前端与第二、第三、第四和后轴承所对应的主轴外壁钻一个直径大小为 10mm，使孔刚好穿过轴承套筒。在加工四个外径为 10mm，内径为 6mm，长度为 37mm 的空心圆柱铜套。

（2）将直径为 5mm 的温度传感器装入铜套，使温度传感器前端接触轴承外壁，用密封胶带将传感器与铜套前端内壁固定，再通过螺纹连接将铜套外壁端固定在孔内，用螺母将铜

套后端固定在主轴外壁。在主轴进油口处分别装上三通，再将分别温度传感器通过螺纹连接在主轴进油口处三通上。

(3) 将主轴前端第二、第三、第四和主轴后轴承内的四个温度传感器分别插入信号采集系统与之对应的第一，第二，第三，第四接口内（这四个温度传感器分别是计算机 LMS 软件系统通道设置对应的 T1, T2, T3, T4），将进油口处的温度传感器的另一端分别插入信号采集系统与之对应的第五，第六接口内（后两个温度传感器分别是计算机 LMS 软件系统通道设置对应的 T5, T6）。

(4) 接通电源，将计算机与信号采集系统用网线联接，打开信号采集系统开关，再打开 Test.Lab Signature 软件，对温度传感器进行通道设置。

(5) 试验台所有装置在装配完毕并进行调试后，根据实验过程中温度变化情况将油气润滑参数理论计算值通过调整装置在低、中、高转速下进行调整、修正；然后进行测试，达到合格要求后对调整好的润滑油量和空气压力、流量进行锁定。

(6) 运行电主轴，在机床常用加工转速 1000~5000r/min 内，每档转速达到稳定温升后，调整一次主轴转速，每次转速调整上升 1000r 来进行实验。用六个温度传感器对各轴承温度及进出口油温进行测试，打开温度窗口，观察测量温度值。

(7) 实验完毕，保存数据，停机。

(8) 将 LMS 测得数据转换为 Excel 格式，通过 Matlab 软件模拟出 T1, T2, T3, T4, T5, T6 在不同转速下的温升曲线图。

4.6 实验数据及分析

不同转速下，电主轴轴承温度变化曲线如图 9a-9d 所示。

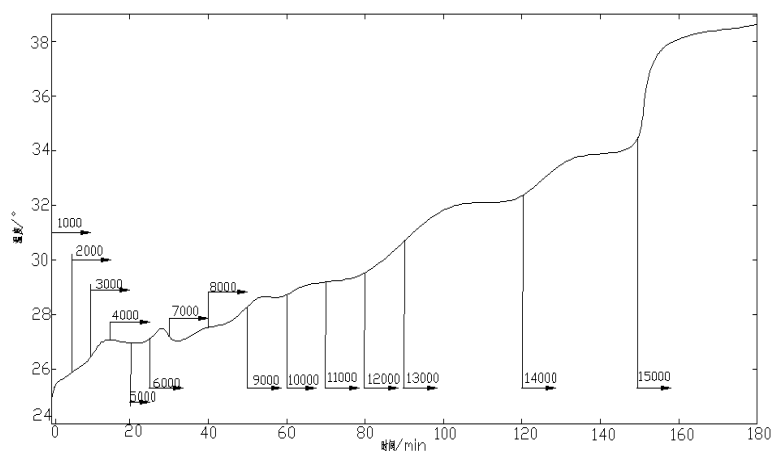


图 9a 主轴前第二轴承的温度数据曲线

从主轴前第二轴承温升变化曲线得知，主轴转速在 4000~5000r/min, 10000~11000r/min

时，主轴前第二轴承温度上升缓慢，在 1000-3000r/min、6000-9000r/min 之间，12000r/min 及 15000r/min 的前十分钟时，温度上升较快，在 13000-15000r/min 时，轴承前十分钟温升较快，当主轴转速、振动达到平衡时，主轴前第二轴承温升达到稳定平衡。

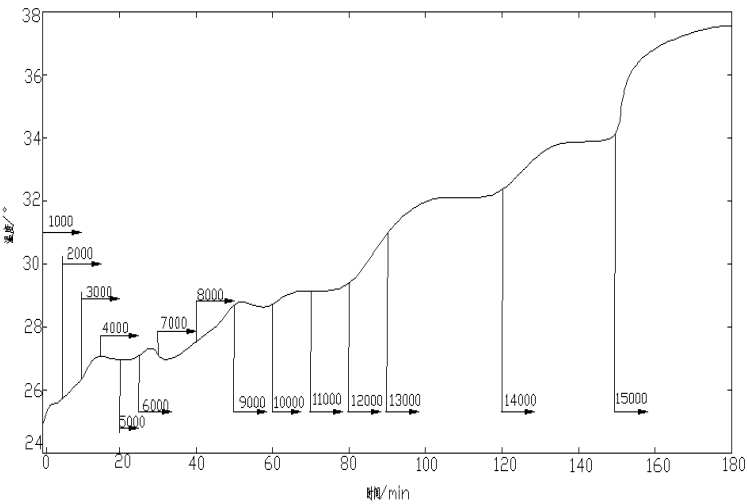


图 9b 主轴前第三轴承的温度数据曲线

从主轴前第三轴承温升变化曲线得知，主轴转速在 4000-5000r/min，10000-11000r/min 时，主轴前第三轴承温度上升缓慢，在 1000-3000r/min、6000-8000r/min 之间，12000r/min 及 15000r/min 的前十分钟时，温度上升较快，在 13000-15000r/min 时，轴承前十分钟温升较快，当主轴转速、振动达到平衡时，主轴前第三轴承温升达到稳定平衡。

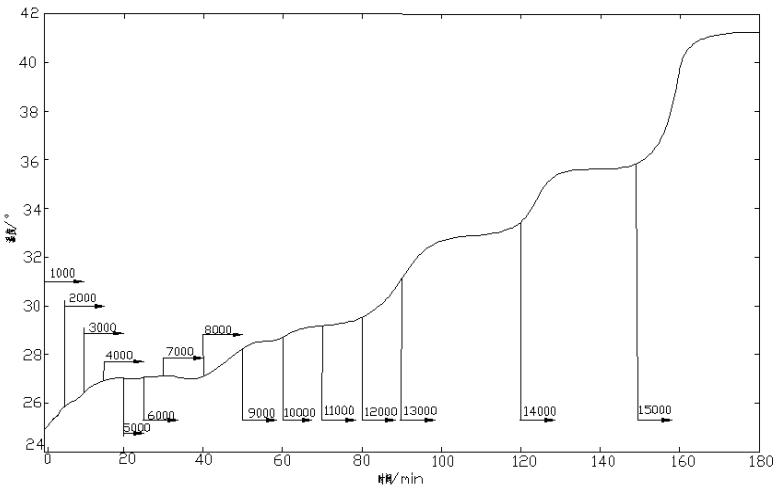


图 9c 主轴前第四轴承的温度数据曲线

从主轴前第四轴承温升变化曲线得知，主轴转速在 4000-7000r/min，10000-11000r/min 时，主轴前第四轴承温度上升缓慢，在 1000-3000r/min、8000-9000r/min 之间，12000r/min 及 15000r/min 的前十分钟时，温度上升较快，在 13000-15000r/min 时，轴承前十分钟温升较快，当主轴转速、振动达到平衡时，主轴前第四轴承温升达到稳定平衡。

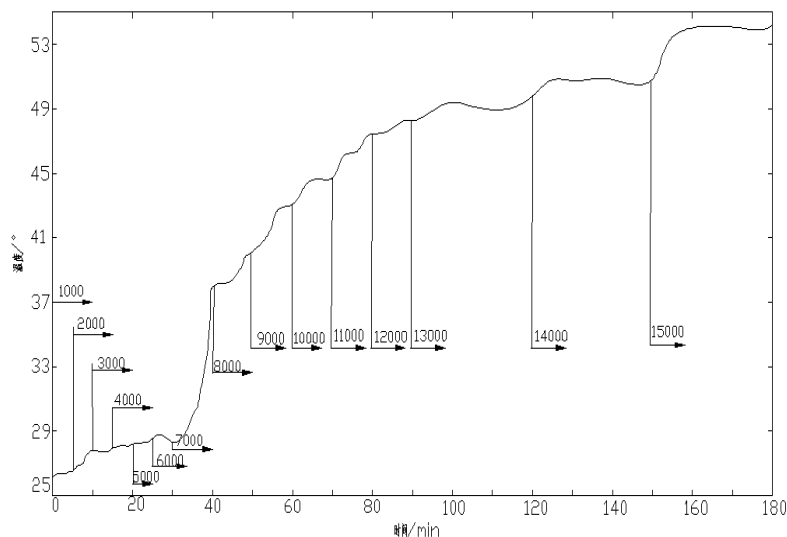


图 9d 主轴后轴承的温度数据曲线

从主轴后轴承温升变化曲线得知，主轴转速在 4000~5000r/min，10000~11000r/min 时，主轴后轴承温度上升缓慢，在 1000~3000r/min、6000~7000r/min 之间，9000r/min、12000r/min 及 15000r/min 的前十分钟时，温度上升较快（特别是在 7000r/min 时），在 13000~15000r/min 时，轴承前十分钟温升较快，当主轴转速、振动达到平衡时，主轴后轴承温升达到稳定平衡。

从以上试验台的主轴前第二、第三、第四轴承及后轴承温升图形可以看出，主轴前端第二、三、四轴承及后轴承的温度从电主轴开机转动到转速达到 3000r/min 时，温升较快，在 4000~5000r/min 时温升曲线平缓，温升较慢，我们将这一现象称为“开机效应”。这是因为，主轴单元刚开始运行时，润滑、冷却系统没有提供足够的润滑作用和充分冷却效果，然后随着主轴单元运行达到稳定状态，系统的各项参数均确定下来，润滑、冷却系统也达到预设状态提供润滑冷却作用，使得主轴单元得以平稳的运转，使主轴的温度变化稳定在设计温控范围之内。

5、结论

在 1000~5000r/min 转速范围内，主轴旋转 5 分钟左右，基本能达到稳定温升；在 6000~12000r/min 转速范围内，主轴旋转 10 分钟左右，基本能达到稳定温升；在 13000~15000r/min 转速范围内，主轴旋转 30 分钟左右，基本能达到稳定温升。

试验证明电主轴在每档转速试验过程中，当主轴在高速旋转时，油气润滑都起到了很好的抑制温度上升的作用。这也证明了油气润滑的气液两相混合流体中含有大量气体和少量的润滑油，不仅能起到很好润滑作用还能及时带走大量的热量，所以它还具有良好的冷却降温作用。

参考文献

- [1] 闫大鹏, 吴玉厚, 张柯. 高速电主轴轴承油气润滑系统的研究[J]. 机械工程与自动化, 2009(2): 77 - 78.
- [2] 李睿远, 柴苍修. 油气润滑技术及系统[J]. 设备管理与维修, 2006(9): 37 - 38.
- [3] 吴隆. 高速铣床电主轴的润滑与冷却[J]. 润滑与密封, 2004(4): 112- 113.
- [4] 杨柳欣, 李松生. 高速电主轴轴承的油气润滑及其应用[J]. 轴承, 2003(3): 23 - 25.

作者简介: 张岩 (1989—), 男(汉族), 硕士研究生, 主要数控机床技术与自动控制方面的研究。

E-mail: zyan8723@163.com 身份证号: 410504198912231510

导师简介: 苟卫东 (1963—), 男(汉族), 硕士研究生, 高级工程师/总工程师, 硕士, 主要从事数控机床、加工中心新技术新产品的开发和研究。E-mail: gouwd@163.com 身份证号 630105196302111032

作者联系: 苟卫东, 联系电话: (0971)7728021 13997098595, 传真: (0971)5201806, E-mail: gouwd@163.com

“高档数控机床与基础制造装备” 国家科技重大专项——高速立卧式加工中心攻关课题 (课题编号: 2009ZX04001-015), 承担单位: 青海一机数控机床有限责任公司。