

微型轴流风机低温失效分析

胡家渝

(中国电子科技集团公司第十研究所, 成都 610036)

摘要: **目的** 研究分析风机低温失效的问题。**方法** 通过研究目前市场上及工程中常用的轴流风机驱动的机电模式及结构形式,分析正常产品驱动电路板的组成,采用替换法,并结合目前装备所处的环境条件综合分析。**结果** 微型轴流风机的润滑油在长期低温储存后发生凝冻转动阻力增大,结合轴承的一种特定失效模式,低温加剧了这一模式的进行的速度,使得转子的转动阻力增大进一步恶化。在加电启动时,由于低温时电路的阻抗小,直流无刷电机的堵转电流较常温时增大约2倍以上,从而导致电机驱动电路烧毁。同时由于电机堵转,电机铁芯热损增大,长期堵转后进一步导致线圈漆包线漆皮的烧毁,直至风机电机彻底烧毁。**结论** 与通常认为低温下出现失效的情况很少相反,低温状态下,由于润滑油的凝冻,轴承可能加速失效,可使风机在低温存储后的一次启动或多次启动中出现烧毁现象。

关键词: 四轴流风机; 无刷直流电机; 失效; 失效机理

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.04.030

中图分类号: TN306 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)04-0154-06

Analysis on Failure of Micro Axial Fan in Low-temperature Environment

HU Jia-yu

(Southwest Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the issue of failure of axial fan in low temperature. **Methods** Through research of the mechanical structure and the driver's circuit system of the typical axial fan in the market and commonly used in engineering, the composition of the driver circuit board of normal products was analyzed. The integrated analysis was conducted on the failure issue in the current environmental conditions by replacement method. **Results** The rotary resistance of the micro axial fan increased due to congelation of lubricating oil after long-term storage in low temperature. In combination, the low temperature accelerated the special failure mechanism of the bearing, making the increase of the rotary resistance of the rotor even greater. In addition, during the electrical start-up process, compared to normal temperature, the locked-rotor current of the brushless DC motor (BLDC) increased by over 2 times due to the small resistance of circuit at low temperature, thus causing overburning of the motor driver circuit. Meanwhile, due to motor stalling, the heat damage of the motor iron increased and the long-term stalling further caused burning of

收稿日期: 2013-03-21; 修订日期: 2013-04-15

Received: 2013-03-21; Revised: 2013-04-15

作者简介: 胡家渝(1978—),男,重庆人,硕士,高级工程师,主要研究方向为电子设备热设计、仿真及评估

Biography: HU Jia-yu(1978—), Male, from Chongqing, Master, Senior engineer, Research focus: thermal design, simulation, evaluation of electronic equipment

enamelled wire thus leading to the total burning of the fan motor. **Conclusion** In contrast to the general thought that failure at low temperature rarely appears, the burning situation of fan occurs during the process of one-time or multiple startup after storage in low temperature due to congelation of lubricating oil and acceleration failure of bearing.

KEY WORDS: axial fan; BLDC; failure; failure mechanism

微型、小型轴流风机为独立电子设备、液冷设备强迫风冷系统的驱动动力机构,起着至关重要的作用^[1]。特别是在大功率射频功率放大器、雷达功TR组件、高速数字处理器中,一旦风机发生故障失效,将直接影响到系统的可靠性及稳定性,直接关乎装备的战术技术性能。长期以来,风机都由机械结构设计人员在设计中进行规划和选用,并未得到应有的重视。随着国内主要军品电机厂家减产、停产军品专用的风机,研制单位仅能采购商用现货市场上的普通工业品风机作为系统的冷却风机。这些风机并不是为军用恶劣环境设计的,相应的能力可能有很大差距。目前凸显的主要问题是其可靠性不高,常常在温度循环试验或振动试验中出现问题。类似设备在文献[2]中分析了其可能的失效模式,在文献[3]—[9]中对该类风机的可靠性等相关问题进行了分析,分析了部分失效机理,建立了相应的寿命预测模型与方法,但由于其所处的环境的多样性,其失效机理还存在许多未考虑到的细节问题,需要进行进一步研究与分析。

Jin-Huek Hur^[10]等针对无刷直流电机驱动的HVAC用风机进行了加速寿命实验,同时建立了完整仿真计算模型,采用CFD及NHT方法分析了研究对象风机PCB板上器热应力分布情况。其研究认为PCB板上的器件发热是导致失效的最主要原因,同时PCB板上器件结露导致的绝缘破坏也是其失效的重要原因。通过ALT研究还指出了BLDC的失效符合Weibull分布,通过全风机物理模型的数值仿真分析其最大的热应力、应变出现在电源芯片引脚上。许家祯等^[11]认为低温的实验条件更加有利于风机加速寿命实验,其研究认为低温环境的加速倍数为常温环境的2.93倍,为高温加速倍数的1.93倍。其研究从一个侧面上反应了低温对微型轴流风机寿命、可靠性的影响更大。在其研究的实验中观察到在-50℃时,其电流高于正常工作允许电流上限,转速高于常工作允许转速上限,这些现象将直接导致风机的失效,在后续的实验中也再次印证文献中出现的现象。

某通信电子装备,工作于不完全封闭的机箱中,在西北某外场进行长期低温存储后,在冬季某日开机工作,启动检测系统功能,运行约5 min后,发现功率放大器输出不正常,由于处于低温状态,并没有考虑到器件烧毁情况。停机,开箱后,发现设备风机发生

烧毁现象。同时运行的另外两台设备却没有出现类似情况,根据失效风机的结构特点进行了相关的分析,得出了失效的原因,同时,通过相应的失效分析及实验证实了相关分析结果的正确性。

1 分析与实验

1.1 微型轴流风机机电结构分析

微型轴流风机的结构在风扇的机械结构中,首先最关键的是风机轴承系统,目前微型轴流风机产品中采用的轴承系统有Sleeve含油轴承、滚珠轴承等。近些年来各风机厂商在轴承方面推出的新技术,诸如磁浮轴承、水波轴承、磁芯轴承、来福轴承等也都是对上面基本形式轴承加以改进而成,运作原理还是没有变化。在实际工程中的风机,通常不会采用低成本粉末冶金工艺的含油轴承(Sleeve轴承),而直接采用双滚珠轴承。

在工程中为保证风机轴承的可靠性,通常采用可靠性最高的双滚珠轴承模式的风机,其典型机械结构组成如图1所示。一般采用2个滚珠轴承的风机结构大多设计为此种结构,2个滚珠轴承间有一挡环隔开,再将弹簧置放于扇叶与第一个滚珠轴承之中间,以弹力产生轴承预压力,预压力不仅有利于定位,而且对噪音的控制有重要作用。滚珠轴承的滚珠与内环、外环及上下分隔是有间隙的,在内部空间里,当没有任何外力施加在滚珠轴承时,造成滚珠在自由空间运作,形成撞击等不规则的现象,从而产生噪音。为消除撞击等不规则现象,在滚珠轴承的轴向施与适当的力量,通过预压将轴向间隙减少,可达到降低噪音的效果。

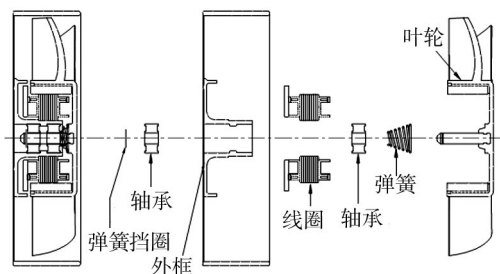


图1 典型双滚珠轴承风机机械结构

Fig.1 Typical structure of the two-ball bearing axial fan

双滚珠轴承的优点是寿命超长,大约在 50 000 ~ 100 000 h,抗老化性能好,适合转速较高的风扇。双滚珠轴承的缺点是制造成本高,并且在同样的转速水平下噪音最大。双滚珠风轴承和液压轴承的封闭性较好,尤其是双滚珠轴承。双滚珠轴承被整个嵌在风扇中,转动部分没有与外界直接接触。在密封的环境中,轴承的工作环境比较稳定。不同轴承的特点见表

1。除风机轴承系统外,其次在机械结构中关键因素为风机的框架的强度、刚度和叶轮的动平衡度。风扇多采用注塑工艺成型为风机框架,在日常工程中,发现某些厂牌的此类风机框架变形量较大,导致在风机叶轮在动态旋转时与其发生碰撞,产生噪音,同时影响风机出力和风机的长期可靠性。
微型轴流风机几乎都采用变频电机^[12-13],即“自

表 1 微型轴流风机常用轴承特点表
Table 1 Characteristics of the bearing used in axial fan

名称	结构特点	工艺要求	成本	噪音	寿命/h
含油轴承	利用润滑油填充、润滑	低	低	低	5 000~8 000
双滚珠轴承	以滚动摩擦代替滑动摩擦	较低	高	高	50 000~100 000
单滚珠轴承	双滚珠轴承之折中产物	较高	一般	一般	>40 000
液压轴承	增加储油槽与自动回油设计	较高	较高	低	>50 000
来福轴承	增加了螺旋形导油槽	较低	较低	低	>50 000
Hypro 轴承	增加储油槽清华轴承材料	较高	较低	低	>40 000
磁悬浮轴承	利用磁悬浮原理减少摩擦必须配合其他轴承使用	高	很高	很低	>50 000
纳米陶瓷轴承	轴承材料与润滑剂采用纳米技术	较低	较高	低	80 000~100 000

控变频同步电机”,变频电机具有直流电机特性,却采用交流电机的结构。也就是说,虽然外部接入的是直流电,却采用直流-交流变压变频器控制技术,电机本体完全按照交流电机的原理去工作。电动机的转速 n 取决于控制器所设定的频率 f ,风机采用定速工作模式。

变频电机的驱动电路由主回路和控制回路两部分组成,现在已经将这两部分集成到同一个芯片中。这样只要使用一个器件便可实现变频电机的全部控制功能,简化了电路结构。在风扇厂家中,常用的控制芯片有日本三洋公司的 LB1964、1962 美国 MAXIM 公司的 MAX6625、和意法半导体公司的 ST72141 等^[12]。

如图 2 所示,典型的两个风机分别采用核心芯片 LB1962 和 Hall 传感器组成的单相全波驱动电路,或是由 Hall 和 6406 组成的两相半波驱动电路。

在电气线路上,商用轴流风机也有必要的保护电路系统,主要包括以下内容。

1) 逆向电压保护:以半导体组件在电源输入端子及 IC 间做缓冲保护,DC 24 V 则要求至 DC 27.6 V。此种保护模式几乎是所有使用者的基本需求,一般常外加二极管或使用其他降压组件来达到需求。

2) 电流限制保护:当电机电流异常上升时(如锁死),会立即切断线圈电源,待数秒后(一般设定为 3~5 s),再进行重新启动。此举可避免因电流过高造成电机部分线圈等电子组件损毁,或造成使用者系统损坏及

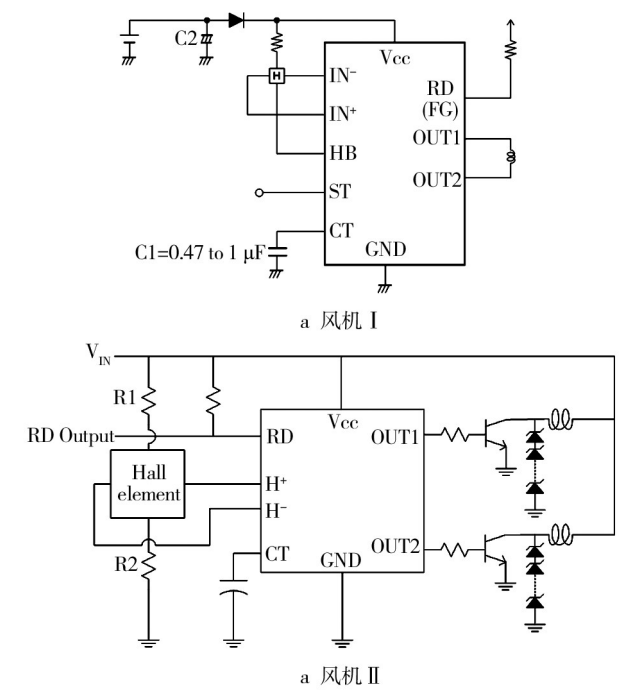


图 2 微型轴流风机常见两种驱动形式
Fig.2 Two typical driver modes used in micro axial fan

误动作,此种保护模式需使用具保护功能的驱动 IC。

3) 温度限制保护:此保护一般是针对电机的驱动 IC 及其组件,它是利用驱动 IC 或霍尔 IC 内建的 TSD 系统,去进行温度感应,以保护敏感的集成电路组件。一般设定的临界温度约为 175 ℃,当达到此温度范围时便会切断电源,以确保集成电路组件不会误动

作及保护线圈等组件。

4) 电机保护:风机在堵转状态下具有自动关断和自动启动能力。这样做的好处是不至于在通电机、风机堵转的情况下使风机、电机温度过高而被烧毁,工业轴流风机的安规要求是风机电机在通电状态持续堵转温度不高于 150 ℃。

根据以上对风机的机械结构和电气结构的分析描述,目前可能产生风机失效的因素主要有:轴承系统、框架与叶轮之间动态干涉、Hall 器件、驱动 IC(放大器、MOSFET 管)、外围保护电路、风机各焊线点断路。

1.2 对实效样品的分析实验

失效风机的外观如图 3—5 所示,可见烧毁现象十分严重(图 3)。通过对相同型号风机的驱动电路板进行分析,其驱动部分电路如图 6 所示,为典型 H 桥电路^[13]。

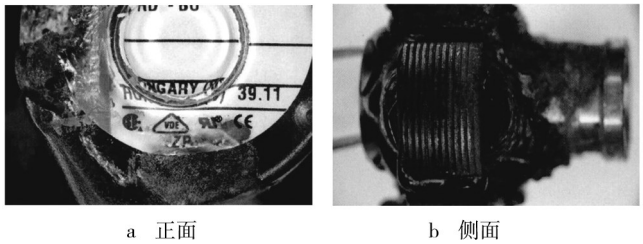


图 3 失效风机外观细节及绕组线圈
Fig.3 Details of axial fan, motor and coil in failure

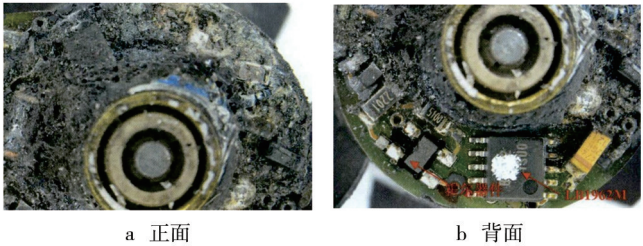


图 4 失效风机 PCB 驱动板
Fig.4 PCB of axial fan in failure

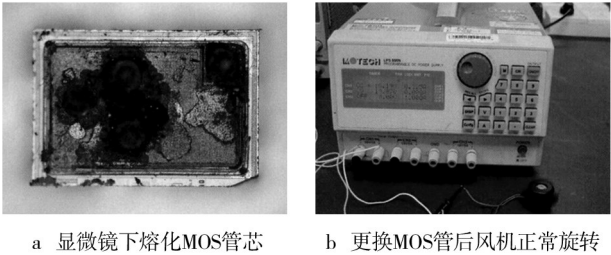


图 5 熔化的 MOS 管管芯及将驱动芯片换到正常风机上仍可工作状态
Fig.5 Fused MOS chip and the driver chip working well when re-placed to normal axial fan

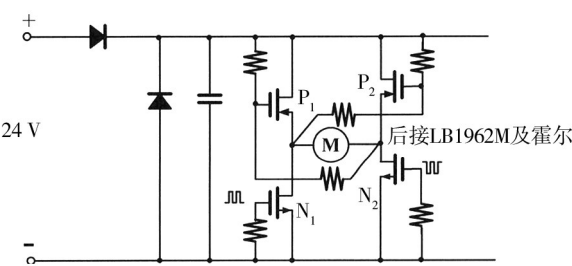


图 6 失效风机采用的 H 桥驱动电路
Fig.6 The H bridge driver circuit of axial fan in failure

对实效样品进行开封,并采用 NIKON SMZ1500 立体显微镜对烧毁的驱动电路 PCB 板进行探查。开封后内部电路如图 6 所示,样品的 PCB 出现烧毁(图 4),内部直接驱动电机线圈的四只 MOS 管区域出现最严重烧毁(图 4)。利用晶体管图示仪对驱动芯片等器件进行分析测试,测试表明主要半导体特性依然存在。将失效的风机的驱动 IC 及霍尔元件更换到通型号风扇驱动电路中(图 5),风机可正常工作,从而进一步证明了其霍尔器件及驱动芯片在烧毁过程没有受到影响。样品线圈整体明显过热,导致铁芯表面及漆包线支架塑料熔碳化,漆包线变黑。检查样品线圈,线圈铜丝未见明显机械损伤及过电流熔融形貌。对开盖后的 MOS 管封装进行照相,MOS 管出现熔融态烧毁现象,表面有金属化重熔,有明显的过流现象。

对整个电路的分析中发现,该类风机中并没有电流限制保护电路和温度保护控制电路,主要原因可能是由于该型号风机尺寸很小,其 PCB 的布板比较紧凑,同时考虑成本问题,没有配置相应电路,为失效的产生提供了可能性。

在实验过程中,此类微型轴流风机的工作电流较常温时大,对此进行了定量测量。测量系统采用如图 7 方式搭建,分别在常温和低温时对其进行了测量。常温温箱设定温度为 25 ℃,低温温箱设定为-55 ℃,

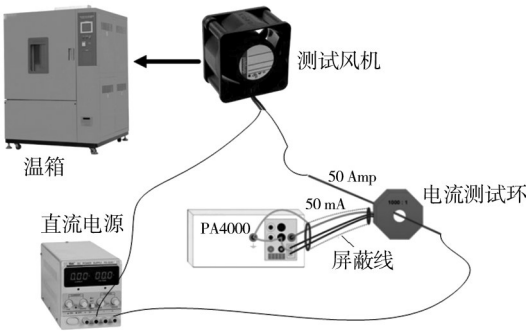


图 7 启动电流测试实验系统
Fig.7 Experiment facility to test the startup current

常温和低温在带到设定温度时均保温2 h再进行测试。由于普通多功能表无法测量其电机的启动电流,故采用泰克PA4000功率分析仪对于该型风机的低温工作电流和启动电流进行了测量。测量表明,在常温时启动电流为230 mA,工作电流为160 mA;在低温时,启动电流为423 mA,工作电流为243 mA,分别增加了84%和52%。低温启动电流的增加也为堵转条件下的烧毁提供了可能性。

2 分析结果

首先,一般来讲,在同步电机的启动阶段,转子因惯性还未转起来,旋转磁场以最大的切割速度使转子绕组感应产生可能达到的最高电势,因而,在转子导体中流过很大的电流。在轴流风机中定子转子是相反的,转动的是具有永磁带的叶轮转子,定子固定于中心位置产生旋转磁场,于是就在定子导体中产生了启动的大电流。定子绕组导体在低温时具有更低的电阻,则启动电流较常温更高。这是导致风机失效的间接原因之一。

其次,由实验分析可知,失效风机的MOS管及与之直接连接的电机线圈过流过热烧毁,风扇卡死电机堵转后,MOS管电流处于短路导通状态。MOS管的通态电阻值较之常温低很多^[14],加之启动时定子的启动电流冲击,驱动电路将在持续高电流下运作,在外场环境长期处于低温的情况下($<-30\text{ }^{\circ}\text{C}$)高于普通商用轴流风机的最低工作温度($-10\sim-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)。两种间接因素的叠加大大加剧了风机过流失效的可能性。通过对同款风机的常温及低温工作电流测试,在正常情况下,风机的电流较之低温时高20%~50%,启动电流增加比率较高50%~100%。根据测试情况,推测在低温堵转时过电流现象将更加严重,可能超过风机低温工作设计容限,故出现了风机烧毁的情况。

对于风机失效的直接原因,分析认为,其主要是因为润滑脂的缘故,其普通工业轴流风机的润滑脂本就不适应在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的条件下使用,润滑脂在滚珠和轴承槽内凝固,轴承的转动阻力增大。由文献^[15—18]可知,轴承本身就存在有粘着磨损和磨粒磨损的失效模式。该模式表现为磨损加剧,并伴随轴承力矩的增大/减小而显著增加,导致轴承不能继续使用产生失效。低温情况下润滑脂的凝固或粘度激增也将进一步增大这种磨粒磨损的趋势,在某一启动过程中可能产生堵转,进而导致风机电气系统的连锁失效,最后造成风机的完全失效。

3 结语

根据对轴流风机机电结构的分析,及对失效样品的技术检测与分析,在工程中出现罕见的低温风机烧毁现象的本质原因是由于潜在的、固有的机械卡死造成了风扇的堵转,从而导致风机的过电流。在常温下过电流并不会烧毁风机,但是在低温下由于其启动电流和运行电流较之常温高很多,且对应该型号风机没有相应的完整保护电路,因此造成连锁的电气失效的产生,最终使得风机发生烧毁。

参考文献:

- [1] 周堃,钱翰博,刘伟,等. 浅谈装备环境适应性与可靠性[J]. 装备环境工程,2014,11(1):72—76.
ZHOU Kun, QIAN Han-bo, LIU Wei, et al. Discussion on Environmental Worthiness and Reliability of Materiel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1):72—76.
- [2] 朱广滕,顾晓辉,方道红,等. 电子部件失效模式试验与仿真研究[J]. 装备环境工程,2013,10(6):45—49.
ZHU Guang-teng, GU Xiao-hui, FANG Dao-hong, et al. Electronic Components Failure Mode Test and Simulation Study[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6):45—49.
- [3] LIU C Q, ZHOU X, YANG S, ET al. Cooling fan Bearing Diagnosis Based on AR& MED[C]// Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (ICQR2MSE), 2012 International Conference.Chengdu, 2012.
- [4] 唐超. 散热风扇轴承故障诊断与状态评估[D]. 成都:电子科技大学,2012.
TANG Chao. Cooling Fan Bearing Fault Diagnosis and State Assessment[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
- [5] 周雪. 散热风扇噪声分析及控制方法研究[D]. 成都:电子科技大学,2013.
ZHOU Xue. Research of Noise Analysis and Reduction Method of Cooling Fans[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [6] 刘朝琴. 散热风扇寿命试验设计与分析[D]. 成都:电子科技大学,2013.
LIU Chao-qin. Cooling Fan Life Test Design and Data Analysis[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [7] 文小琴,孟亮,徐叶平,等. 冷却风扇的失效机理与寿命预测方法研究[C]// 第25届中国控制与决策会议.贵阳,2013.
WEN Xiao-qin, MENG Liang, XU Ye-ping, et al. Research of the Failure Mechanism and Lifetime Prediction to Cooling

- Fans[C]// The 25th Chinese Control and Decision Conference. Guiyang, 2013.
- [8] JOHN M Hogan, The Effect of Fan-reliability and Cooling Performance on Electronic Chassis Reliability[J]. IEEE Transactions on reliability, 1993, 42(1): 50—53.
- [9] 张正忠. 产品加速寿命测试规划之研究—以8025无刷直流风扇为例[D]. 高雄:国立高雄第一科技大学, 2004.
- ZHANG Zheng-zhong, Study on Accelerated Life Test Plan—A Case Study Of 8025 Brushless DC Fan[D]. Kaohsiung: National Kaohsiung First University of Science and Technology, 2004.
- [10] HUR Jin-huek, LEE Tae-gu, MOON Sun-ae, et al. Thermal Reliability Analysis of a BLDC Motor in a High-speed Axial Fan by the Accelerated-life Test and Numerical Methods[J]. Heat Mass Transfer, 2008 (44): 1355—1369.
- [11] 许家祯, 马恒, 翁田山. 低温加速运用于风扇产业之寿命测试可行性评估[C]// 台湾省第五届可靠度与维护度技术研讨会论文集. 台湾, 2003.
- XU Jia-zhen, MA Heng, WENG Tian-shan. The Evaluation of Low Temperature Acceleration Life Test on DC-Fan Product[C]// 5Th Reliability and Maintainability Symposium Proceedings. ROC China, 2003.
- [12] 陈忠民. 采用变频技术的电脑散热风扇[J]. 电子世界, 2004, 10(9): 62—64.
- CHEN Zhong-min. Cooling Fans Used Frequency Conversion Technical[J]. Electronics World, 2004, 10(9): 62—64.
- [13] 洪乃刚. 电力电子技术基础[M]. 北京:清华大学出版社, 2011.
- HONG Nai-gang. Fundamental of Power Electronics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [14] 杨广辉. 功率MOSFET低温动态特性研究[D]. 北京:中国科学院电工研究所, 2006.
- YANG Guang-hui. The Dynamic Characteristics of Power-MOSFETs in Low Temperature[D]. Beijing: Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Science, 2006.
- [15] SANYO LB1964T Datasheet[Z]. SANYO Electric Co., Ltd, 2001.
- [16] HARRIS T A. Rolling Bearing Analysis[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1991.
- [17] 刘春浩. 微型轴承的失效模式及其对策[J]. 轴承, 2002, 32(12): 28—31.
- LIU Chun-hao. Failure Mode and Its Countermeasure for Miniature Bearing[J]. Bearing, 2002, 32(12): 28—31.
- [18] 姜绍娜, 陶德华, 陈晓阳, 等. 低温下润滑剂对微型轴承启动摩擦力矩的影响[J]. 轴承, 2011, 41(9): 33—35.
- JIANG Shao-na, TAO De-hua, CHEN Xiao-yang, et al. Influence of Lubricant on Starting Friction Torque of Miniature Bearings Under Low Temperature[J]. Bearing, 2011, 41(9): 33—35.

(上接第149页)

- Research and Application of Project Management Using MVC Design Model[J]. Application Research of Computers, 2006, 7(2): 159—164.
- [8] 娄一艇, 林端宜. 基于工作流的科研项目管理系统的设计与实现[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2008; 29(8): 17—18.
- LOU Yi-ting, LIN Duan-yi. Design and Realization of Research Project Management System Base on Work Process[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2008: 29(8): 17—18.
- [9] 杨长胜, 蓝启城. 海军航空装备腐蚀防护与控制管理架构设想[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 105—110.
- YANG Chang-sheng, LAN Qi-cheng. Management Scheme on Naval Aeronautical Equipment Corrosion Prevention and Control[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 105—110.
- [10] 唐平, 黄晓霞. 环境试验数据资源建设的思考[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 140—147.
- TANG Ping, HUANG Xiao-xia. Consideration of Environment Test Date Resource Construction[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 140—147.