

# 商用多联机室外机电机支架 动力学分析及优化设计

张浩

(珠海格力电器股份有限公司)

**摘要** 利用有限元仿真技术对某商用多联机室外机电机支架进行动力学分析,并利用试验结果证明仿真计算结果的准确性。基于仿真计算结果对电机支架进行优化设计,有效解决电机支架的共振问题。

**关键词** 多联机;电机支架;振动;有限元法

## Dynamics analysis and optimization design of outdoor unit's motor bracket for commercial multi-split air conditioner

Zhang Hao

(Gree Electric Appliances, Inc. of Zhuhai)

**ABSTRACT** The motor bracket of one commercial multi-split air conditioner is analyzed using finite element simulation technology, and the accuracy of simulation results is proved by experiment. The optimization design of motor bracket is conducted based on the simulation results, and the resonance of motor bracket is solved effectively.

**KEY WORDS** multi-split air conditioner; motor bracket; vibration; finite element method

商用多联机室外机需求风量大,风机档位多,电机和风叶质量大,若设计过程中没有将电机支架固有频率避开激励频率,电机支架组件会发生共振而产生异常噪声。目前电机支架的设计仍是经验指导为主,试验验证为辅,一款成熟的电机支架往往需要经过多次优化设计和试验验证,该方法设计周期长,设计效率低,严重影响了整机产品的开发周期。有些研究人员利用有限元仿真技术对电机支架进行了动力学分析<sup>[1]</sup>,在一定程度上指导了电机支架的优化设计,空调行业也有工程人员针对室内机离心风机电机支架做了相关的优化设计分析<sup>[2]</sup>,但针对多联机室外机轴流风机用的电机支架优化设计的研究相对较少。

针对12 hp(1 hp=0.735 kW)商用多联机室外机电机支架组件,笔者在设计初期利用有限元仿真技术进行动力学分析,预测该电机支架可能导致的质量问题,然后对样品做模态试验、振动加

速度试验和噪声测试,检验仿真计算的可靠性。基于分析结果对电机支架进行优化设计,并用试验对优化方案进行验证。

### 1 模态计算和模态测试

#### 1.1 模型简化处理和材料定义

多联机室外机电机支架组件包括双轴流风机、双电机及由多个钣金件搭建成的电机支架。由于动力学分析主要关注的是电机支架的结构,电机本身的刚度要远大于前两者的刚度,为了提高计算效率将电机简化为实体,内部的线圈和零件全部删除,通过增加质量点的方式保证其质量和重心与简化前一致;塑料开模叶片表面的细小倒角,模具标示全部删除,保留其根部对风叶刚度影响较大的几何特征;钣金件全部抽壳然后再赋予材料厚度。简化模型如图1所示,该组件所包含的材料有2种:Q235钢和as+20%GF。材料参数如表1所示。

收稿日期:2015-03-27

作者简介:张浩,本科,助理工程师,主要从事结构振动、噪声研究。

表 1 各种材料的参数

材料	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比
Q235 钢	7 850	210	0.3
as+20%GF	1 200	5.5	0.35

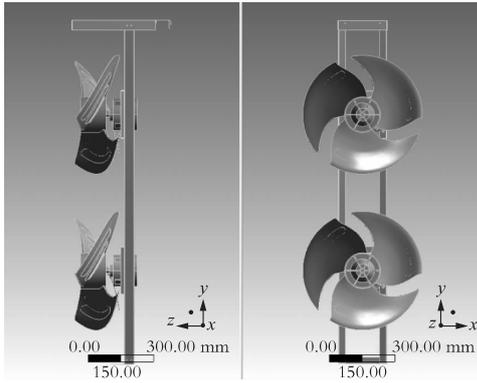


图 1 电机支架简化图

1.2 网格划分、接触设置及边界条件

考虑到各零部件的结构特点,针对不同的结构采用不同单元进行网格划分。风叶采用四面体网格,电机采用六面体网格,电机支架采用四边形壳单元,网格示意图如图 2 所示。考虑到各零部件之间是互相固定在一起,基本上没有脱落的可能性,所以各零部件之间的接触采用 MPC 绑定接触。另外,钣金抽壳后各零部件之间会存在较大的几何间隙,接触区域用 pinball 控制,半径设置为 3 mm。具体设置参数如表 2 所示。



图 2 电机支架网格图

表 2 绑定接触设置参数

接触类型	绑定接触
接触域模式	自动
接触行为	程序控制
接触修饰	程序控制
修饰公差/mm	4.344 8
抑制	No
算法	MPC
检测方法	程序控制
弹球区域	Radius
区域半径/mm	3

电机支架组件模态分析的边界条件相对比较简单,顶部和底部与壳体连接部位采用位移全方位约束即可。

1.3 模态分析设置和结果后处理

多联机室外机采用直流电机,无需考虑电源频率;转速范围为 350~810 r/min,有 3 个叶片,所以激励频率为 17.5~40.5 Hz。因此设置提取 0~100 Hz 范围内的固有频率便足以满足需求。其中:第 4 阶、5 阶、7 阶、8 阶、10 阶、12 阶和 13 阶的振型主要集中在风叶上,属于风叶的固有频率;第 1 阶、2 阶、3 阶、6 阶、9 阶和 11 阶是以电机支架的振型为主,具体振型见图 3。

1.4 多联机室外机电机支架组件模态测试

为了验证数值计算结果的准确性,进行锤击模态测试,使用 LMS 公司的型号为 SCMO5 的测试仪器,现场测试图如图 4(a)所示,在电机支架上布置 6 个传感器。测试结果见图 4(b)。

以电机支架振型为主的固有频率的数值计算与测试结果对比见表 3。可以发现,测试结果与仿真计算结果很接近,前 4 阶固有频率相差 1 Hz 左右,后 2 阶固有频率相差 4 Hz 左右,考虑到风机的激励频率一般在 50 Hz 以下,因此,对于电机支架组件固有频率的预测完全可以由仿真计算完成。

表 3 固有频率对比

模态	模态测试	仿真计算	Hz
第 1 阶	29.198	30.205	
第 2 阶	36.788	35.187	
第 3 阶	44.791	44.746	
第 4 阶	56.036	57.026	
第 5 阶	75.444	79.493	
第 6 阶	90.174	93.280	

2 振动加速度和噪声测试

2.1 振动加速度测试

为更准确了解风机运行时电机支架的振动形态,进行振动加速度测试,对多联机室外机风机从 350 r/min 到 810 r/min 每隔一定转速采集一次加速度频谱。加速度传感器的探头安装在电机支架中间部位,分别在后方和左方各布置一个传感器,用来采集前后方向和左右方向的加速度。根据转速计算激励频率  $f = \frac{Nn}{60}$  (其中,  $N$  为转速,  $n$  为叶片数),并绘制加速度随激励频率变化的曲线图(见表 4 和图 5)。风机的不平衡力会随转速的提升而加大,因此加速度随转速的提升总体呈上升的

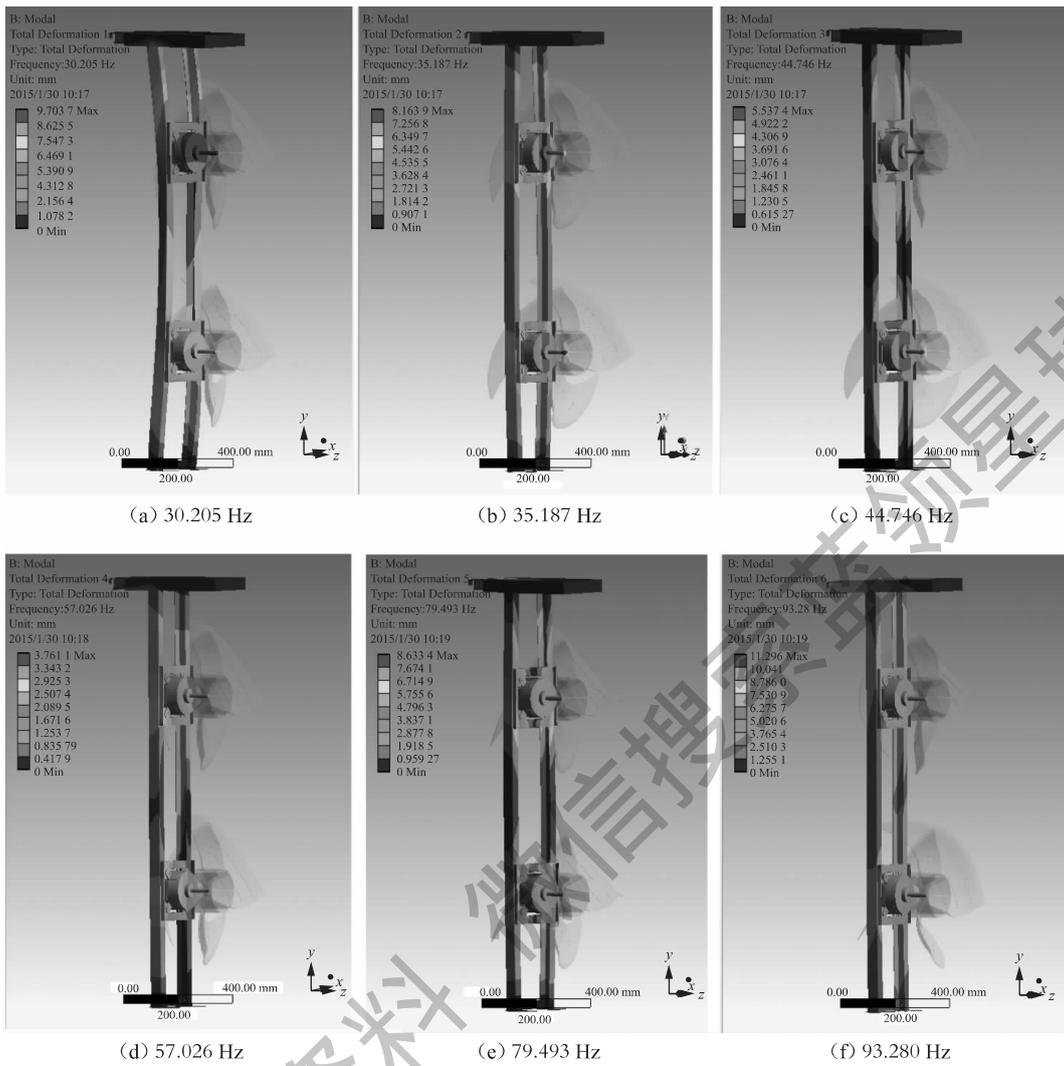


图 3 电机支架振型图

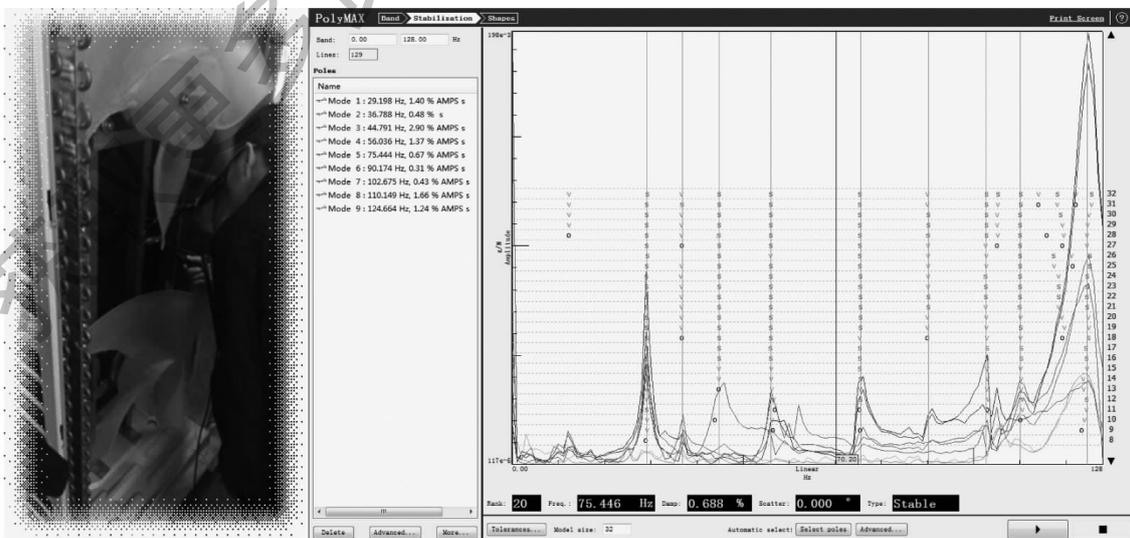


图 4 模态测试现场及测试结果

趋势,在激励频率 28.5 Hz 和 36.5 Hz 处存在明显的波峰,加速度频谱的峰值频率为激励频率的偶数倍,显然电机支架在转速 570 r/min 和 730 r/min 时发生了共振,这 2 个转速下的激励频率正好与电机支架组件的第 1 阶和第 2 阶固有频率接近。

表 4 振动加速度测试结果

转速/ (r/min)	加速度/(m/s <sup>2</sup> )		峰值频率/Hz		峰值/(m/s <sup>2</sup> )		激励频 率/Hz
	右	后	右	后	右	后	
350	1.18	4.00	214	321	0.20	0.64	17.5
370	1.24	4.10	759	326	0.20	0.93	18.5
410	1.29	4.15	122	122	0.25	0.89	20.5
450	1.30	4.26	133	133	0.58	2.58	22.5
490	1.49	4.45	147	147	0.81	3.30	24.5
530	1.44	4.60	159	159	0.76	2.62	26.5
570	1.90	5.40	171	855	1.09	3.10	28.5
610	1.55	5.08	183	365	0.74	2.84	30.5
650	1.50	4.80	195	389	0.84	2.70	32.5
690	1.58	5.10	414	414	0.70	1.88	34.5
730	2.30	5.60	438	438	1.32	3.34	36.5
770	2.00	5.20	461	692	1.28	2.11	38.5
810	2.05	5.30	486	486	1.11	2.12	40.5

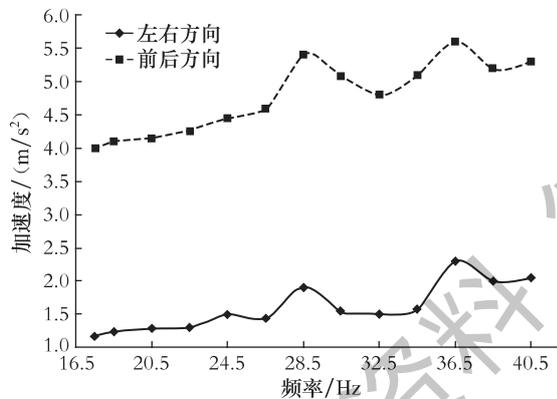


图 5 振动加速度随激励频率的变化情况

### 2.2 噪声测试

为了更准确地评估该款电机支架,在半消音室内对该室外机进行噪声测试,分别在室外机前后左右 1 m 处各布置 1 个数据采集麦克风,麦克风高度为 1 m 加 0.5 倍的机身高度。单开风机,从 350 r/min 到 810 r/min 每隔一定转速采集一次数据,数据见表 5。噪声总值随转速的变化如图 6 所示。由表 5 和图 6 可以看出,随着转速的提高,噪声总值整体呈上升趋势,其中前侧的声压级最高,后侧的声压级最低,左右两侧的声压级居中,左右两侧麦克风采集的数据在 570 r/min 和 730 r/min 转速时有明显的峰值,另外现场体验音质发现在这 2 个转速下有明显的不连续低频嗡嗡声,在左右以及后侧听都较为明显。观察 570 r/min 转速时测试的噪声频谱(见图 7(a))可以发现其在

342 Hz 有明显峰值,为激励频率 28.5 Hz 的 12 倍频,且除了前侧以外其他三侧的峰值与总值之差均在 5 dB(A)以内,这表明 342 Hz 的声音非常突出,在总值中的占比非常大,可以判断为电机支架共振引起的异常噪声。730 r/min 时也发生了共振(见图 7(b)),且激发了异常噪声。

表 5 噪声测试结果

转速/ (r/min)	声压级/dB(A)				现场音 质评判
	后侧	前侧	左侧	右侧	
350	29.60	36.20	32.80	35.40	较好
370	30.90	37.80	34.10	36.70	较好
410	35.86	41.90	38.20	39.70	较好
450	38.90	45.10	41.00	43.70	较好
490	38.97	46.36	42.34	45.36	较好
530	42.10	49.30	48.50	46.00	较好
570	43.90	51.00	53.10	49.40	不连续低 频嗡嗡声
610	44.20	52.70	49.00	47.00	较好
650	48.30	55.20	50.00	50.00	较好
690	48.60	56.50	52.00	54.50	较好
730	50.40	58.20	55.40	57.40	不连续低 频嗡嗡声
770	51.40	59.40	53.00	55.00	较好
810	53.40	62.10	55.00	60.60	较好

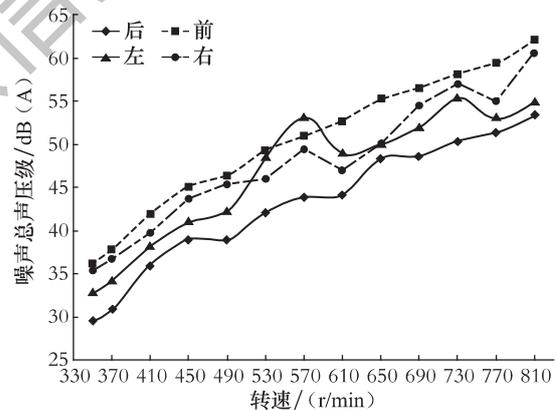
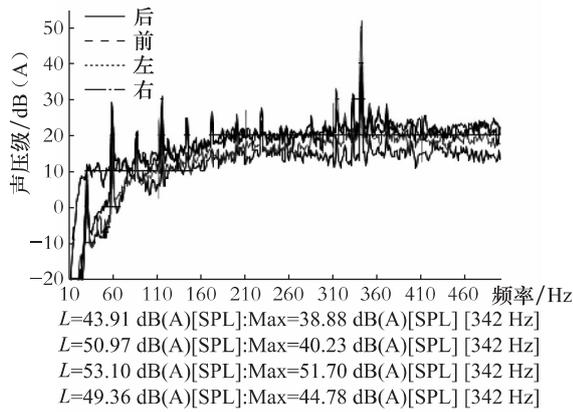


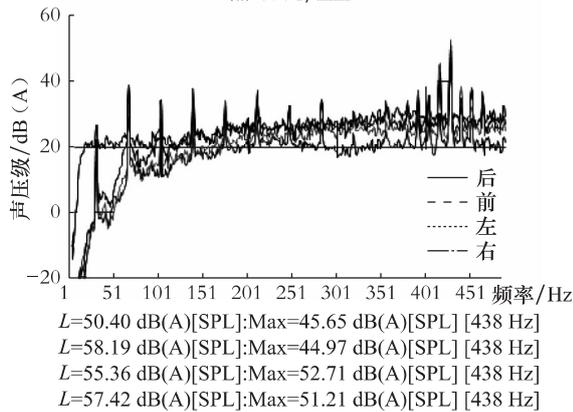
图 6 噪声总声压级随转速的变化情况

### 3 电机支架优化设计

风机转速为 350~810 r/min,实际激励频率为 17.5~40.5 Hz,而原始的电机支架落在此区间的固有频率有 2 阶,只需要将这 2 阶固有频率上移,保证第 1 阶固有频率大于 42 Hz 即可。根据固有频率的公式  $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$  (其中:K 为结构刚度, M 为质量),若要提升固有频率,就需要提高结构刚度或降低质量。该电机支架和风机都是已匹配好的,做过大量的性能试验验证,通过更换电机或风叶降低质量是不现实的,只能试图提升结构的刚度提高固有频率。考虑到室外机壳体空间局限



(a) 570 r/min



(b) 730 r/min

图 7 不同转速下噪声频谱

性,电机支架的结构不能做大改动,制定了 2 个比较容易实现,但对结构刚度有较大影响的变动,如表 6 所示。对优化后的方案分别做模态计算,结果如表 7 所示,显然方案 3 能够满足需求。进一步对方案 3 的结构进行噪声测试,结果如表 8 所示,没有出现不连续低频嗡嗡声。

表 6 电机支架优化方案

方案	更改点
方案 1	将电机支架下端两条折边与底部的折边焊接在一起(见图 8)。
方案 2	将电机支架的材料厚度由 1.5 mm 改为 2 mm。
方案 3	a)将电机支架下端两条折边与底部的折边焊接在一起; b)将电机支架的材料厚度由 1.5 mm 改为 2 mm。

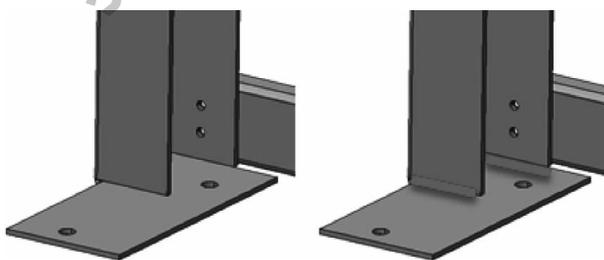


图 8 底部折边焊接示意图

表 7 优化方案对固有频率效果对比

方案	电机支架前 3 阶固有频率/Hz
1	32, 33, 36, 12, 45, 21
2	39, 21, 44, 12, 53, 12
3	43, 57, 48, 55, 56, 27

表 8 方案 3 噪声测试结果

转速/(r/min)	声压级/dB(A)				现场音质评判
	后侧	前侧	左侧	右侧	
350	29.2	35.7	32.5	35.1	较好
370	30.5	37.2	33.4	36.0	较好
410	35.7	41.5	37.7	39.1	较好
450	38.5	44.9	40.8	43.5	较好
490	38.6	46.2	42.1	44.8	较好
530	41.9	49.1	46.1	45.1	较好
570	43.2	50.3	47.5	46.2	较好
610	44.3	53.0	49.1	46.9	较好
650	47.9	55.2	50.2	49.8	较好
690	48.6	56.5	52.0	53.5	较好
730	50.0	57.8	53.1	54.4	较好
770	51.6	59.3	53.3	55.3	较好
810	53.2	62.2	54.8	58.5	较好

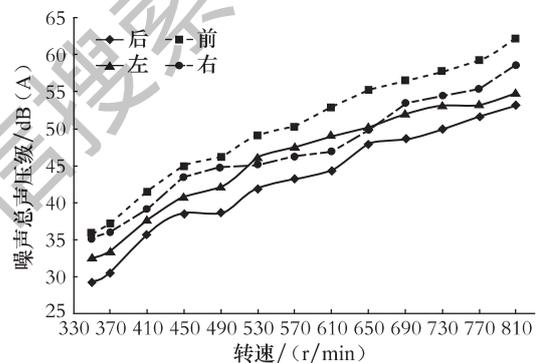


图 9 方案 3 噪声总声压级随转速的变化情况

#### 4 结论

利用有限元仿真技术对多联机室外机电机支架做动力学分析,并进行试验验证,得出以下结论:

1) 测试得到的固有频率与利用有限元仿真得到的固有频率较接近,说明计算时对模型做的简化处理、接触设置、网格划分以及边界条件设置合理,有限元仿真计算的结果可靠性较高;

2) 电机支架振动加速度测试和噪声测试结果表明,该多联机室外机电机支架确实与电机支架组件固有频率接近的激励频率点发生了共振,同时还诱发了异常的不连续低频嗡嗡声;

3) 增加电机支架的厚度和将底部两条折边焊接使得电机支架组件的最低固有频率上移至最大激励频率之上,使第一阶固有频率大于 42 Hz,解决了电机支架共振的问题,且由共振引发的异常噪声随之解决。

(上转第 12 页)

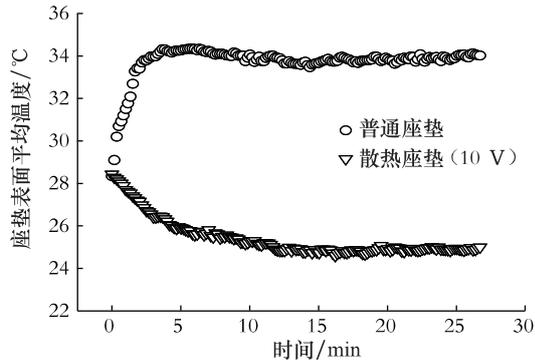


图 9 座垫表面平均温度变化曲线

度低至 25 °C,比普通座垫的低 9 °C。其降温散热效果十分显著,极大提高了骑行的舒适性。

2) 除了良好的散热性能,通过创新设计的脚踏泵、自行车发电装置等设备,座垫水循环散热系统将自行车的动能转化成冷水循环的动能以及制冷所需的电能,节能而环保。可根据踏板转动的快慢,调节冷水流量,具有一定的调节作用。

3) 实际骑行中的环境温度多变,这要求座垫水循环散热系统在不同环境温度下都能够正常工作。而现阶段的系统还是在单一的环境温度下运行,因此需要对进一步完善。在后续研究中,应该在不同的温度工况下进行测试,找出其各自的最佳运行工况,作为自动调节系统的依据。以制冷片冷热端温差和冷端温度为调节目标,对系统的输入电压进行调节,使得系统能够在较大的温度范围内运行。

5 结束语

基于半导体制冷的座垫水循环散热系统是根据现有自行车的结构特点设计而成的,其特点和优势在于:采用循环水冷却的方式,无须改变现有座垫的形状和结构,易于与自行车及其改装行业相结合;将半导体制冷片、保温水箱、翅片散热器制成一体,既充分利用对流空气的散热作用,也易于装设在自行车上;有效利用骑行中的机械能,减

少了外部能源的使用,节能环保。

座垫散热系统解决了常见座垫散热难的问题,提高了骑行舒适性,有利于自行车骑行的推广,而且其结构简单、易于加工制造、成本低廉,容易与庞大的自行车及其改装行业相结合,必将有广阔的市场发展前景。

参考文献

[1] 姜文华,宜毛毛,徐彦. 城市公共自行车发展建设浅析[J]. 道路交通安全,2015,12(2):61-64.

[2] 朱玮,庞宇琦,王德,等. 公共自行车系统影响下居民出行的变化与机制研究——以上海闵行区为例[J]. 城市规划学刊,2012(5):76-80.

[3] 单晓峰,王伟,万千,等. 基于行为分析的自行车交通方式选择机理研究[J]. 现代城市研究,2006(11):81-88.

[4] 黄海波,丁玉兰. 自行车鞍座的人机工学设计[J]. 工程图学学报,2005(3):106-110.

[5] 吕梦琪,朱宁嘉. 基于人体工程学的自行车座垫的研究[J]. 科技视界,2014(32):179-180.

[6] 马俊来,边扬,王伟. 城市交通方式间相对出行舒适度研究[C]//交通与物流第六届交通运输领域国际学术会议论文集(上卷). 大连,2006:111-116.

[7] 李洪涛. 辽宁省女子自行车运动员递增负荷运动中体核温度基及相关生化指标变化的研究[D]. 沈阳体育学院,2011.

[8] 戴维涵,代彦军,张鹏,等. 半导体制冷元件特性参数测量及选用[J]. 上海交通大学学报,2004,38(10):1669-1972.

[9] 纪志坚,杨萍,吕志家,等. TEC 制冷系统最佳运行工况的理论分析与试验研究[J]. 制冷与空调,2015,15(2):47-50.

[10] CHEN C P, HWANG R L, CHANG S Y, et al. Effects of temperature steps on human skin physiology and thermal sensation response[J]. Building and Environment,2011(46):2387-2397.



(下接第 26 页)

参考文献

[1] 李初晔,孙彩霞,张喻林. 旋压机电机支架的有限元分析与结构优化[J]. CAD/CAM 与制造业信息化,2010,17(Z1):77-79.

[2] 宋培刚. 空调离心风机电机支架优化设计[J]. 日用电

器,2012,55(6):14-18.

[3] 陶志军,邓坤,岳凤来. 电动汽车电机支架的强度分析[J]. 汽车工程师,2009,36(7):23-26.

[4] 许鹏,宋培刚,聂旺辉. 电机支架可靠性分析及优化[J]. 家电科技,2012,12(3):81-83.

[5] 刘晓明,迟毅林,伍星,等. 某水下航行器电机支架的动力学分析[J]. 机械与电子,2012,12(11):12-14.