

高速列车空调冷凝风机的变频应用研究

崔明璐¹, 余 敏¹, 龙时丹², 陈 彪¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海法维莱交通车辆设备有限公司, 上海 201906)

摘要: 列车在高速运行中表面产生的负压使冷凝风量相继减小. 通过数值模拟计算不同车速下冷凝风机入口的平均负压值和冷凝风量, 结果表明, 高速工况下的负压影响冷凝风机正常运行. 选取大容量冷凝风机并采取变频调节方式, 建立以冷凝温度为反馈信号的 PID 控制方式, 比较不同车速下定频与变频运行所消耗的功率, 得出变频运行冷凝风机在列车低速运行时具有良好的节能效果和一定的变工况适应性, 为变频技术在列车冷凝风机上的应用提供了技术依据.

关键词: 高速列车; 空调机组; 冷凝风机; 变频调节

中图分类号: TU 831 **文献标志码:** A

Frequency Conversion Application to Condenser Fan in Air Conditioning System for High-Speed Train

CUI Ming-lu¹, YU Min¹, LONG Shi-dan², CHEN Biao¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Faiveley Traffic Equipment Co. Ltd., Shanghai 201906, China)

Abstract: The negative pressure on the surface of high-speed train reduces cooling air volume successively. The average negative pressure value and cooling air volume were obtained by numerical simulations at different speeds. The results show that the negative pressure in high-speed conditions impacts the running of condenser fan. Larger condenser fan was chosen, frequency conversion technique was used, and a PID control method taking condensation temperature as feedback signal was established. The power consumption was compared between variable frequency operation and constant frequency operation at different speeds. It is concluded that the frequency conversion condenser fan has good energy saving effect and load adaptability at low speed. The conclusions provide technical basis for the application of frequency conversion condenser fan to high-speed train.

Key words: high-speed train; air conditioning unit; condenser fan; frequency conversion

收稿日期: 2013-09-30

基金项目: 上海市宝山区产学研合作资助项目(CXY-2011-06)

第一作者: 崔明璐(1989-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 强化传热与节能技术. E-mail: cuiminglulu@126.com

通讯作者: 余 敏(1952-), 女, 教授. 研究方向: 强化传热与节能技术. E-mail: ymusst@qq.com

伴随着经济社会的进步,我国的高速列车得到了迅速的发展,列车在高速运行时表面产生的负压不容忽视.高速列车采用单元式空调系统,冷凝风机置于列车顶部,冷凝风机通过强制通风将冷凝器的热量带走.高速运行列车表面产生的负压会使冷凝风量减小,影响空调机组的安全运行.随着电力电子和自动控制技术的发展,变频节能技术得到了广泛的应用,但列车空调系统变频技术应用研究较少.因此,高速列车冷凝风机的变频技术研究对于保证空调机组的安全、高效运行,促进其在列车空调系统上的应用具有重要意义.

1 高速列车空调冷凝风机表面压力模拟和分析

由于空气具有粘性,列车在高速运行时会在列车的表面形成附面层,附面层里为负压,且列车速度越高,表面的负压越大^[1].冷凝风机表面负压值影响其工作状态,而列车运行时表面负压的测量难度较大,因此使用 Fluent 软件对冷凝风机表面压力进行模拟计算,从而得出不同速度下冷凝风机压力的分布情况和负压值.

1.1 计算模型和方法

高速列车由数节客车组成,但距离车头一段距离后流动稳定.为简化运算,采用3节车厢进行模拟,如图1所示.用一节头车、一节客车、一节尾车代表整列车,头车、尾车具有相同的外形,此类简化方法在列车模拟中被广泛地采用^[2].冷凝风机位于列车中间客车顶部的中央,取 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 的正方形作为冷凝风机进风口.同时将列车表面视为平滑曲面,忽略车门把手、窗户等微小部件和周围设施的影响.列车流场相对于车身中央平面左右对称^[3],为减小计算量,只计算半车身的流场,计算域为 $150\text{ m} \times 12\text{ m} \times 10\text{ m}$.

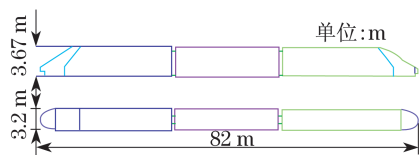


图1 高速列车物理模型

Fig.1 Physical model of high-speed train

由于高速列车运行速度相对较低(马赫数 $Ma < 0.3$),其外部流体可视作不可压缩定常流体,故列车表面空气流动视为黏性、不可压缩、定常流动.目前在列车表面气流组织的模拟中,主要采用

$\kappa - \epsilon$ 两方程湍流模型^[4],并取得了较好的结果.本文也选用该湍流模型对冷凝风机表面压力进行模拟.控制微分方程包括:连续性方程、动量方程、能量方程、湍流动能方程和湍流耗散率方程,具体控制方程见文献^[4].计算时方程的对流项采用一阶迎风差分格式,压力速度的耦合采用 SIMPLE 算法.

对具有复杂外形的列车头部,采用四面体非结构网格;车身形状规则,采用六面体结构网格.头部的非结构网格和车身的结构网格组成的混合网格,使计算具有良好的精度和较快的速度.为提高列车表面流场的准确性,对列车壁面和尾流的网格进行加密处理.列车车头和车身的网格如图2所示.假设列车静止,气体以相对列车的运行速度流经列车,入口采用速度边界条件,出口采用压力出口边界条件,纵剖面为对称面.采用 Fluent 软件模拟车速分别为50,100,150,200,250,300,350 km/h时,冷凝风机表面压力场的分布情况.

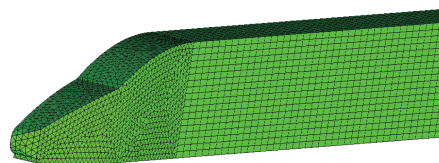


图2 列车车头和车身网格

Fig.2 Grid of train head and train body

1.2 冷凝风机表面压力场的模拟结果

图3为车速200 km/h时冷凝风机表面的压力分布图.可见,冷凝风机表面压力分布较均匀,呈现较小的负压,压力值在 $-100 \sim 0\text{ Pa}$ 之间,流动稳定,冷凝风具有良好的气流组织对冷凝器进行冷却;各节列车连接处附近出现较大的压力波动.

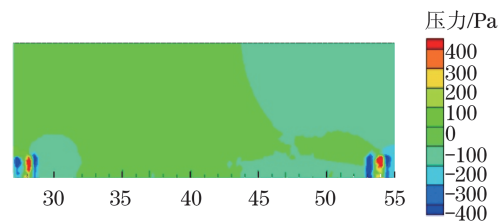


图3 冷凝风机表面压力分布图

Fig.3 Surface pressure distribution on condenser fan

不同车速下的压力分布规律相同.采用 Fluent 软件分别计算在不同车速下冷凝风机入口表面负压的平均值.在管道阻力不变的情况下,冷凝风机实际进口压力为管道压阻与表面负压值(绝对值)之和. CRH₃高速列车空调冷凝风机采用型号为LKT36No-5.6AV的冷凝风机,其额定风量为 $8\,000\text{ m}^3/\text{h}$,全压

为 200 Pa,由进口风压结合冷凝风机性能曲线可得到不同车速下的冷凝风量,计算结果如表 1 所示.

表 1 不同车速下冷凝器工作参数
Tab.1 Condenser operating parameters at different speeds

车速/ (km·h ⁻¹)	风机表面 负压/Pa	风机进口 压力/Pa	冷凝风量/ (m ³ ·h ⁻¹)
50	-1.4	171.4	7 703
100	-7.8	177.8	7 601
150	-20.3	190.3	7 378
200	-39.4	209.4	6 976
250	-64.6	234.6	6 329
300	-96.1	266.1	5 341
350	-135.7	305.7	3 812

由表 1 可知,随着列车车速的提高,冷凝风机入口表面负压和冷凝风机实际进口压力逐渐增大,冷凝风量逐渐减少.当列车速度较低时,风机入口负压较小,冷凝风量的减少量不大.随着车速的提高,冷凝风量的减少开始加剧.当列车速度为 350 km/h 时,冷凝风机的入口负压为 135.7 Pa,达到风机全压的 68%,严重影响风机的正常工作,冷凝风量与额定风量相比减少 50% 以上.冷凝风量的减少使冷凝器换热情况恶化,部分热量不能正常排出,冷凝器换热系数降低,冷凝温度、压力和空气出口温度提高.冷凝压力的提高进一步导致压缩机耗功变大,制冷量和制冷系数下降,从而影响列车空调的正常、高效运行^[2].

定义无量纲的列车表面压力系数 c_b ,表达式为

$$c_b = \frac{p_b}{q_\infty} = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho v_\infty^2}$$

式中, p_b 为表面压力差; p 为表面压力; p_∞ 为大气压力; q_∞ 为动压; v_∞ 为空气相对于列车的流速; ρ 为空气密度.

列车车速大于 100 km/h,冷凝风机入口压力系数值保持在 -0.02,此时列车表面压力进入自模拟区,即列车的运行速度对压力系数影响不大,与文献 [4] 中列车外表面空气压力的分布规律相同,验证了冷凝风机入口压力的模拟结果有较高的可信度.

2 列车空调冷凝风机的变频调节

2.1 列车风机的选型方案

针对表面负压使冷凝风量不足的影响,在不改变空调机组结构和冷凝风机位置的前提下,可以通过使

用大容量的冷凝风机,以提高风机的全压和冷凝风量,保证在表面负压较大时冷凝风机能正常运行.

取列车运行速度最高、冷凝风机入口负压最大的恶劣工况进行冷凝风机选型.所选风机在列车高速运行时位于额定工况附近,但是在离额定工况较远的车速下,经济性较差,即出现“大马拉小车”的情况.为此,采用变频调节技术,在保证高速工况列车空调正常运行的前提下,提高列车空调系统低速和变工况运行的经济性.

2.2 变频调节原理和应用

异步电动机的转速 n ,电源频率 f ,转差率 s ,电机磁极对数 P 之间的关系为

$$n = 60 f(1 - s)/P$$

当转差率基本不变时,转速与电源频率成正比,改变电源频率即可改变电动机的转速,并改变与电动机联接的风机的转速,从而实现对风机运行的调节^[5].

风机的各项性能参数与其转速有着密切关系:风机的风量与风机的转速成正比;风机的风压与其转速的平方成正比;风机的轴功率等于风量与风压的乘积,故风机的功率与风机转速的三次方成正比.因此,变频调节通过调整输入电源的频率调节风机转速,从而达到调节风机的流量、风压等性能参数的目的.与其它调节方式相比,变频调节通过改变自身的性能曲线实现不同工况的调节,在调节过程中没有节流损失,调节效率高,经济性好.

随着电力电子和自动控制技术的发展,变频器的价格不断下降,性能价格比不断提高,促进了变频调节技术的应用.变频调节广泛应用于泵与风机的节能改造中,节能效果明显.变频调节也可以使风机进行软启动,实现连续运行,减少风机的启动次数,既能减少启动电流,又延长了机组寿命.变频调节技术在 CRH₂ 动车组分体式空调系统和上海轨道交通 5 号线中已有应用,具有良好的运行效果,值得在其它列车上推广使用.

2.3 高速列车变频调节的控制方式

高速列车变频调速可采用 PID 闭环控制系统,如图 4 所示.控制系统由 PID 控制器、变频器、冷凝风机等组成,以冷凝风量作为被调节量,通过变频器调节冷凝风机的输入频率,实现冷凝风机的高效、节能运行.PID 控制器接受室内温度的测量值,与空调装置的温度设定值比较,控制变频器的输出频率.为了适应高速运行时列车表面的负压,以冷凝器入口负压值为前馈信号,及时地调整不同运行速度时冷

凝风机的转速.以冷凝器的冷凝温度为反馈信号,保证稳定的冷凝温度,可以更好地适应列车空调在不同地区和不同空气温度时的良好运行.

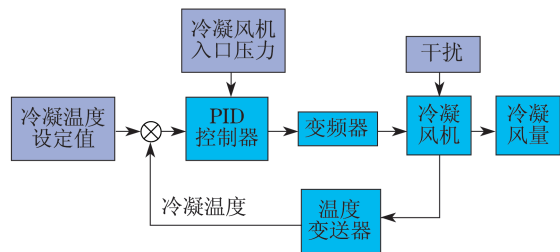


图 4 变频调节的控制方框图
Fig.4 Block diagram of variable frequency regulation control

3 冷凝风机变频运行性能分析

3.1 冷凝风机变频运行的节能分析

根据风机的选型方案选取大容量冷凝风机,其型号为DQ35-11-6.3,参数如表2所示^[6].电动机

型号为 YT90S-4,其功率为 1.10 kW.

表 2 冷凝风机的型号及参数
Tab.2 Condenser fan models and parameters

冷凝风机 型号	转速/ (r·min ⁻¹)	风量/ (m ³ ·h ⁻¹)	全压/ Pa	功率/ kW
DQ35-11-6.3	1 450	14 000	173.0	1.06

比较该风机在不同车速下,定频与变频运行时风机的性能参数,如表 3 所示.当列车运行速度为 350 km/h,冷凝风机定频运行时,额定冷凝风量为 8 354 m³/h,与上述冷凝器散热所需 8 000 m³/h 的额定冷凝风量相比,能够使冷凝器内冷却工质充分散热,表明风机的选型合适,在不同的车速下都能提供足够的冷凝风量,维持空调机组的正常运行.但该风机的定频运行存在两个问题,一是冷凝风量偏大.不同车速下的冷凝风量都大于额定风量,特别是列车低速运行时,冷凝风量过大,如 50 km/h 的车速下冷凝风量达到 14 025 m³/h,为额定风量的 175%.同时也会加剧风机的磨损,降低风机的使用寿命.二是所耗费的功率偏大.

表 3 冷凝风机的性能参数
Tab.3 Performance parameters of condenser fan

定频运行				变频运行				
车速/ (km·h ⁻¹)	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	压力 /Pa	功率 /kW	频率 /Hz	转速 /(r·min ⁻¹)	压力 /Pa	功率 /kW	节能率 /%
50	14 025	171.4	0.89	28	827	55.7	0.17	80.9
100	13 893	177.8	0.92	29	834	58.8	0.18	80.4
150	13 598	190.3	0.96	29	853	65.9	0.19	80.2
200	13 044	209.4	1.01	31	889	78.7	0.23	77.2
250	12 118	234.6	1.05	33	957	102.2	0.30	71.4
300	10 663	266.1	1.05	38	1 087	159.5	0.44	58.1
350	8 354	305.7	0.95	48	1 388	280.1	0.83	12.6

如图 5 所示,风机功率在250 km/h和300 km/h 时达到最大.车速为 350 km/h 时,风机效率较高,冷凝风机的功率略有下降.随着车速的降低,风机功率逐渐降低,但下降的幅度较小.在低速情况下,耗费较大功率,提供过大的冷凝风量,增加冷凝风机的功耗.由此可得,在高速情况下,定频运行冷凝风机效果较好,但速度越低,冷凝风量的过量程度越大,定频运行效果越差.

冷凝风机采用变频运行时,通过 PID 控制器控制风机的转速,在不同的车速下保持额定的冷凝风量,避免低速情况下冷凝风量过大,维持冷凝压力和温度的相对稳定.变频运行时,不同车速下的功率

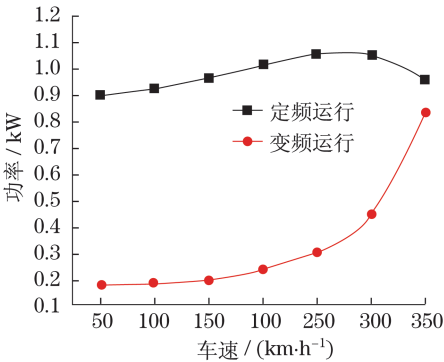


图 5 冷凝风机的功率对比图
Fig.5 Powers comparison of condenser fan

如图5所示.变频运行可以显著降低冷凝风机的功率.车速较低时,变频运行冷凝风机的功率较小.车速提高时,冷凝风机的功率逐渐变大,在350 km/h的车速下功率达到最大值.

与定频运行相比,变频运行在不同的车速下都具有节能效果.在50 km/h的车速下,变频运行时的功率仅为0.17 kW,节能率为80.9%;在300 km/h的车速下,变频运行时的节能率超过50%;在最高车速350 km/h下,变频运行仍有12.6%的节能率.随着列车车速降低,列车入口的负压值变小,冷凝风机所提供的压头变低,在保持冷凝风量不变的情况下,冷凝风机的输入频率降低,风机的功率变小.列车在低速运行时,变频运行时的节能效果较好.由此可得,变频运行的冷凝风机可以在列车高速运行时提供额定的冷凝风量,维持空调机组的正常运行;低速运行时在提供额定冷凝风量的同时,降低冷凝风机的转速,实现节能运行;且列车运行速度越低,变频运行的节能效果越明显.

3.2 变频风机的变工况分析

冷凝风机采用外界空气对冷凝器进行冷却,冷却效果与空气状态相关,因此冷凝风机变工况情况较为复杂.一方面,不同的地区、时间和天气情况导致外界空气温度变化较大,相同流量的空气对冷凝器的冷却效果不同;另一方面,乘客人员的变动造成空调热负荷的变化,通过冷凝器交换的热量不同,因此所需的冷凝风量随热负荷而变化.定频运行的冷凝风机变工况下以额定的转速运行,在热负荷较低、外界空气温度低、冷凝效果好时,仍提供额定的冷凝风量,从而造成冷凝风量偏大,冷凝风机功耗增大.

以冷凝温度为反馈的变频调节冷凝风机对不同的工况有很好的适应能力.PID控制器接受冷凝温度的反馈信号,通过变频器降低冷凝风机转速和流量,空调热负荷降低或者外界空气温度变低,冷凝效果加强时,冷凝器所需冷凝风量减少,以保证变工况下冷凝温度和压力的稳定,同时降低风机转速,实现变工况下的节能运行.

4 结 论

a. 通过模拟列车在不同车速下表面压力场的分布情况,得出冷凝风机入口表面负压的平均值.结合风机的性能曲线,得到不同车速下的冷凝风量,表明高速运行时引起的负压使冷凝风量减少.

b. 根据列车运行时表面负压的最大值选取冷凝风机.采用变频调节技术,提出以冷凝温度为反馈的PID闭环控制系统,实现冷凝风机的安全、高效运行.

c. 在不同车速下,对定频与变频运行进行节能和变工况分析,得出定频运行在高速情况下效果较好,而在低速时冷凝风量过大,消耗的功率大.变频运行在不同的车速下都有一定的节能效果,且车速低时节能效果良好.同时,变频运行对变工况的适应性较好.

d. 冷凝风机的变频运行可提高高速列车空调机组的经济性和舒适性.变频运行也可推广到地铁空调风机^[7],结合压缩机的变频运行,实现地铁空调机组的节能、舒适运行.

参考文献:

- [1] 沈裕浩,彭彪,丁力行.列车空调的运行特性[J].制冷学报,1998,19(2):15-19.
- [2] 姚俊豪,马龙,徐君瑜,等.列车提速对空调机组的影响[J].上海理工大学学报,2012,34(6):571-574.
- [3] 赵旭,余敏,龙时丹,等.内燃机车喷雾冷却的模拟研究[J].上海理工大学报,2013,35(5):475-478.
- [4] 田红旗.列车空气动力学[M].北京:中国铁道出版社,2007.
- [5] 何川,郭立君.泵与风机[M].北京:中国电力出版社,2008.
- [6] 孙研.通风机选型实用手册[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [7] 徐君瑜,余敏,龙时丹,等.列车空调变负荷影响和变频技术应用研究[J].上海理工大学学报,2013,35(6):572-576.

(编辑:董 伟)