

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.05.003

基于低分辨率位置传感器的电动汽车用 轮毂电机的控制

栾 捷, 陈阳生*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为了提高低分辨率位置传感器电机系统中的转子位置和转速估算精度,介绍了采用低分辨率霍尔位置传感器估算转子位置和转速的基本原理和方法,讨论并且比较了为提高估算精度所采取的不同策略,并结合电动汽车轮毂电机永磁体极对数较大的特点,提出了线性转子位置校正的方法以及自动边界位置补偿法,以抑制因电机霍尔位置传感器安装偏差导致的转子位置估算误差。并搭建了以TMS320F28035为核心的系统实验平台,通过与同轴连接的光电编码器信号进行比较分析,对提出的算法进行了实验研究。实验结果表明,该算法能够有效提高永磁同步轮毂电机转子位置和转速的估算精度,使系统的动态和稳态性能得到改善,并且为今后该算法在电动汽车上的应用打下了良好的基础。

关键词: 电动汽车; 永磁同步电机; 低分辨率; 位置传感器; 轮毂电机; 控制

中图分类号: U463; TH133.3; TH39; TM301.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)05-0524-06

Controlling of wheel motor in electric vehicle with low resolution hall effect sensors

LUAN Jie, CHEN Yang-sheng

(College of Electric Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of rotor position and speed estimated by low resolution Hall effect sensors, several different methods to obtain high resolution rotor position from the low resolution Hall sensors were described and compared with experimental test. Then a novel method to adjust rotor position gradually rather than immediately force to reference angle while sector switching and a new algorithm to adjust reference angle automatically were proposed. Finally, a drive system was set with a control software coded based on TMS320F28035 as a platform to test the algorithm. The experimental results indicate that the new method is capable of improving rotor speed and position with higher accuracy and lower error. And it lays a good foundation for further experiment in electric vehicle applications.

Key words: electric vehicle; permanent magnet synchronous motor (PMSM); low resolution; hall effect sensor; wheel motor; control

0 引言

随着能源短缺的日益凸显以及环境污染的日益加剧,电动汽车作为一种环境污染小且使用电能作为驱动的新能源汽车引起了人们越来越多的关注。随着永磁材料的发展和电力电子技术的进步,电机驱动系统也有了长足的进步。其中,将电动机直接安装在车轮上(即采用轮毂电机多轮直接驱动汽车)的方案

由于省去了传统汽车的变速器、差速器甚至半轴,可以大大简化电动汽车的传动系统,并且使结构更加紧凑,从而降低整车的重量^[1],因此,受到了很大的关注。

此外,由于永磁同步电机具有功率密度大、运行效率高、转子损耗小等优点,被广泛用于电动汽车的驱动。对永磁同步电机的控制需要对三相电流进行Park变换,因此,电机转子位置的精确性对于永磁同步电机的控制极其重要,传统的获取转子位置的方法

收稿日期: 2012-12-28

作者简介: 栾 捷(1987-),男,浙江舟山人,主要从事永磁同步电机驱动方面的研究。E-mail: luanjie@zju.edu.cn

通信联系人: 陈阳生,男,教授,博士生导师。E-mail: yschen@zju.edu.cn

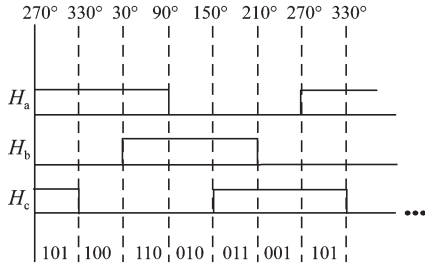


图3 三相位置霍尔信号

$$\omega = \frac{\pi}{3} \frac{1}{\Delta t} \quad (1)$$

2.2 低分辨率位置传感器估算转子位置方法

目前,利用低分辨率传感器计算电机转子位置的方法的基本思想是:根据电机机械时间常数远远大于电气时间常数的特点,认为电机在单个位置区间的转速是均匀的,因此可以利用上一个区间的平均速度计算当前区间的电角度^[6],并且在霍尔信号变化时,对转子位置进行强制校正以避免累积误差。

转子位置估算方法示意图如图4所示。

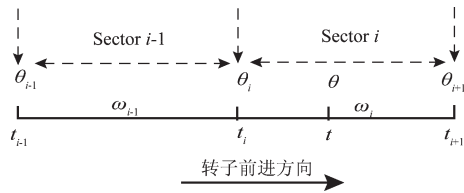


图4 转子位置估算方法示意图

其计算公式如下所示:

$$\omega_{i-1} = \frac{\pi}{3} \frac{1}{t_i - t_{i-1}} \quad (2)$$

$$\theta = \theta_i + \omega_{i-1} \Delta T \quad (3)$$

$$\theta_i \leq \theta \leq \theta_{i+1} \quad (4)$$

式中: ω_i —在第 $i-1$ 区间内的平均速度; t_i —在进入 i 区间的时刻; θ_i, θ_{i-1} —两区间的边界角,即强制校正角; ΔT —转子在区间的运动时间。

当电机运行在稳定区,且电机速度也稳定时,研究者通过这种方法可以精确地计算出当前的转子位置。但在电机起动加速,或者电机转速发生突变时,上一区间的转速 ω_{i-1} 不能准确代替当前电机转速,可能会因此影响角度计算的精度^[7]。

2.3 引入加速度分量的一阶转子位置估算方法

针对在转速变化较快时转子位置计算误差过大的问题,为了改善电机控制的动态性能,本研究在上述方法的基础上,又提出了一种考虑电机加速度的计算方法^[8],其本质是:对转子位置表达式(3)进行泰勒级数展开,对电机速度 ω 进行二阶求导得到一个加速度 a 。

引入加速度分量的一阶转子位置估算方法示意图如图5所示。

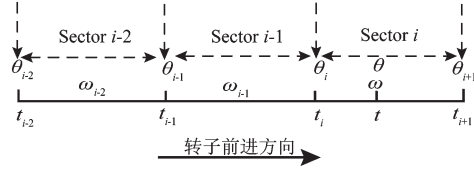


图5 引入加速度分量的一阶转子位置估算方法示意图

其中,加速度的计算公式为:

$$a_{i-1} = \frac{(\omega_{i-1} - \omega_{i-2})}{\frac{t_i - t_{i-2}}{2}} \quad (5)$$

转速与转子位置计算公式如下:

$$\omega = \omega_{i-1} + a_{i-1} \Delta T \quad (6)$$

$$\theta = \theta_i + \omega_{i-1} \Delta T + \frac{a_{i-1} \Delta T^2}{2} \quad (7)$$

$$\theta_i \leq \theta \leq \theta_{i+1} \quad (8)$$

该方法引入了加速度的计算,即认为即使在同一区间内,速度也是变化的,能够在速度突变导致区间速度给定不准的情况下予以补偿,从而减小了位置估算误差,提高了角度的计算精度^[9]。但同时,阶数的提高必然导致算法的复杂化以及计算量的增大,因此,更高阶数的算法没有实际使用意义。

2.4 一种改进的估算转子位置方法

在上一种方法中,对于 ω_i 的估算是在上一区间的平均值 ω_{i-1} 的基础上作加速计算的,而实际上,由于加速度 a 的引入,对于2.3节所述算法,笔者又提出了一种改进方法,即可以用本区间开始瞬间的转速 ω_{i0} 来代替上一区间平均转速 ω_{i-1} ,以进一步减小计算误差^[10]。

使用该改进方法估算转子位置示意图如图6所示。

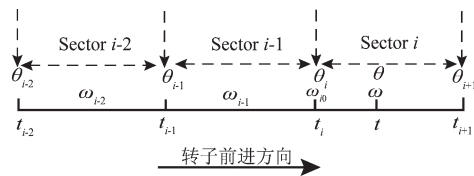


图6 使用改进方法估算转子位置示意图

改进后的计算公式如下:

$$\omega_{i0} = \omega_{i-1} + a_{i-1} \cdot \frac{t_i - t_{i-1}}{2} \quad (9)$$

$$\omega = \omega_{i0} + a_{i-1} \Delta T \quad (10)$$

$$\theta = \theta_i + \omega_{i0} \Delta T + \frac{a_{i-1} \Delta T^2}{2} \quad (11)$$

$$\theta_i \leq \theta \leq \theta_{i+1} \quad (12)$$

2.5 对于多区间计算平均速度的讨论

由于本研究所讨论的轮毂电机极对数高达23对,

即机械角度相差 θ 相当于电角度的 23θ , 因此, 对于三相霍尔位置传感器的安装精度要求非常高。由于安装工艺导致的精度问题, 可能会造成三相霍尔之间位置不对称的情况出现, 此时3个霍尔信号所对应的电角度之间相隔不为 $\pi/3$ 。当B相霍尔传感器安装偏差 $\Delta\theta$ 时, 区间100与区间011宽度变为 $\pi/3 + \Delta\theta$, 而与之相对, 区间110与区间001宽度则变为 $\pi/3 - \Delta\theta$, 而当多相相轴安装出现偏差时, 情况更加复杂。具体情况(即一相霍尔位置传感器安装偏差对霍尔区间的影响)如图7所示。

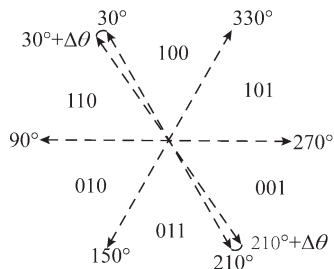


图7 一相霍尔位置传感器安装偏差对霍尔区间的影响

图7中, 此时研究者如果仍然按照上述方法进行计算, 可以导致电机转速计算的误差, 针对该问题可以使用计算多区间平均速度的方式来改善电机转速的精度。同时, 在换相角度校正上由强制校正角度改为渐进校正角度的方式, 以改善转子位置估算的精度。

多区间平均速度的基本方法为: 假定在 $i-1$ 区间的平均速度 ω_{i-1} 为过去 N 个区间的平均速度, 并且在计算电角度方法同2.3节中阐述的方法相同。

多区间平均测速示意图如图8所示。

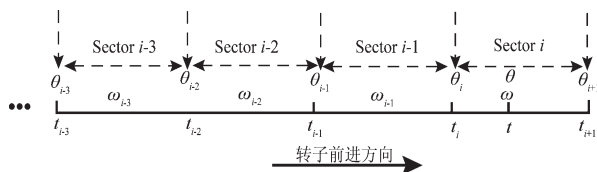


图8 多区间平均测速示意图

相应的第 $i-1$ 区间的转速计算式为:

$$\omega_{i-1} = \frac{N \cdot \frac{\pi}{3}}{t_i - t_{i-N}} \quad (13)$$

其中, 由于转子磁钢的安装精度较高, 当 N 取值为6时, 式(13)计算的转子转过电角度等于 2π , 在此情况下, 可以最大限度地减小由于三相霍尔位置传感器安装偏差导致的测速误差, 以提高计算精度。但由于这种方法的本质是对速度的计算进行一个滑动滤波, 用于本区间计算的速度实际上是前 N 个区间的平均速度, 并且 N 值越大, 滤波越明显, 会导致速度实时性较差, 动态性能较低, 仅适用于高速稳态运行的时

候, 在低速区和速度变化较大的时刻, 则不适用。因此, 本研究在转子高速运转时选择 $N=6$, 以追求稳态计算精度, 而在转子起动和低速运转时选择 $N=1$, 以追求动态响应速度。同时, 为避免在两种方式临界转速附近来回切换导致电机响应变慢甚至停转, 本研究在程序上设置了一个速度滞环节。

2.6 对于换相时转子位置校正方式的讨论

由于速度计算误差或者转子位置计算分辨率过低等原因, 当换相时, 可能会发生估算角度 θ 不等于校正角 θ' 的情况, 如果对转子位置进行强制校正, 可能出现角度发生突变的情况。

此外, 该偏差可能是由于三相霍尔位置传感器安装位置的偏差导致的换相角本身存在偏差, 如果强制校正可能会进一步加大转子角度位置的误差。

转子位置突变的情况会导致电机运行中电流的扰动, 因此, 本研究提出了一种线性角度校正的方式进行校正, 以取代强制校正。其思想是: 在换相瞬间不强制校正转子位置, 而是计算出估算的转子位置 θ 与校正点角度 θ' 的差值 $\Delta\theta$, 同时, 假定电机转子在两个区间内经过的时间是相同的, 从而在下一个区间内均匀地补偿回去, 以实现转子位置的连贯, 避免累积误差的产生。

采用两种校正方式(强制校正与线性校正)时的转子位置变化如图9所示。

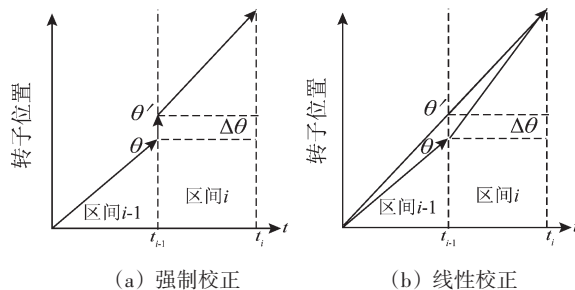


图9 强制校正与线性校正的转子位置变化

图中:

$$\Delta\theta = \theta' - \theta \quad (14)$$

$$\theta = \theta_i + \omega_{i-1} \Delta T + \frac{a_{i-1} \Delta T^2}{2} + \frac{\Delta\theta}{t_i - t_{i-1}} \cdot \Delta T \quad (15)$$

2.7 对于校正霍尔位置偏差的措施的讨论

研究者通过前面介绍的在换相时采用线性过渡的方式, 可以有效地消除由于霍尔位置偏差造成的转子位置阶跃的情况, 而对由于霍尔位置传感器安装误差本身而造成的转子位置误差却不能完全消除, 因此, 为了消除该误差, 必须对霍尔六区间边界的准确位置分别进行校正。

对于霍尔区间边界校正也可以通过人工校正(即手动修正每条边界所对应的转子位置)来实现, 但由于每台电机霍尔位置传感器的安装偏差不同, 本研究

又提出了自动补偿霍尔边界角的方法,其基本思路是:由于磁极的安装精度相对较高,因此,每经过6个霍尔区间,可以认为转子经过了 2π 电角度,而误差很小,现假设转子以恒定转速 ω 匀速运动, θ_{i_adj} 为边界 i 的准确位置与标准参考位置的误差量,区间边界实际对应转子位置与校正角示意图如图10所示。

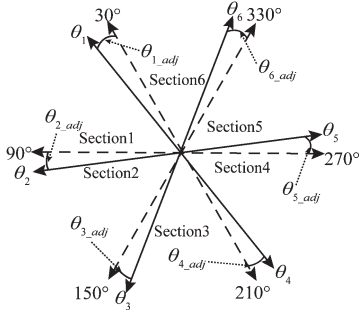


图10 区间边界实际对应转子位置与校正角示意图

则估算的 $\omega k \Delta t$ 为第 i 区间的实际宽度,可表达为:

$$\omega \Delta t_i = \frac{\pi}{3} + \theta_{i+1_adj} - \theta_{i_adj} \quad (16)$$

则每次换相时的角度阶跃可以表达为:

$$\Delta \theta_{i+1} = \theta_{i+1_adj} - \theta_{i_adj} \quad (17)$$

其中,根据2.6节中的讨论,可以通过估算得到 $\Delta \theta$,因此,本研究假定某条边界与标准参考边界的误差量 θ_{i_adj} 已知,则任意一条边界都可以通过对式(17)的叠加来获得,从而可以实现对于霍尔区间边界校正角的自动修正,如下式所示:

$$\theta_{i+n_adj} = \sum_{k=i}^{k=n} \Delta \theta_{k+1} + \theta_{i_adj} \quad (18)$$

每条边界的准确位置为:

$$\theta_i = \theta_i' + \theta_{i_adj} \quad (19)$$

区间边界校正示意图如图11所示。

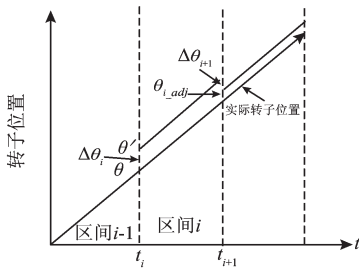


图11 区间边界校正示意图

3 实验结果

本研究实验所用电机为一台安装有三相霍尔位置传感器的永磁同步电机,其极对数为23,额定电压为72 V,通过本研究前述驱动器驱动,并与安装有2 500线光电编码器同轴连接所测的实际位置作为参考,用以测量其计算误差。

其轻载时给定300 r/min的转速以及电流阶跃响应如图12所示。

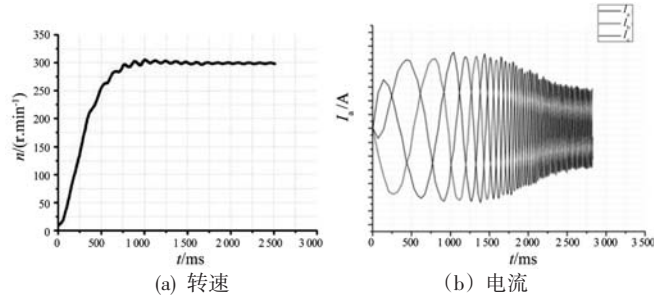


图12 轻载时给定300 r/min的转速及电流阶跃响应

在电机运行在低速下(100 r/min)时采用零阶角度计算法的估算转子位置与编码器计算转子位置及其误差波形如图13、图14所示。

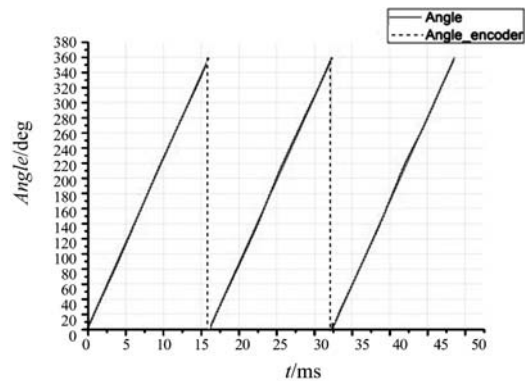


图13 采用零阶角度计算法的转子位置

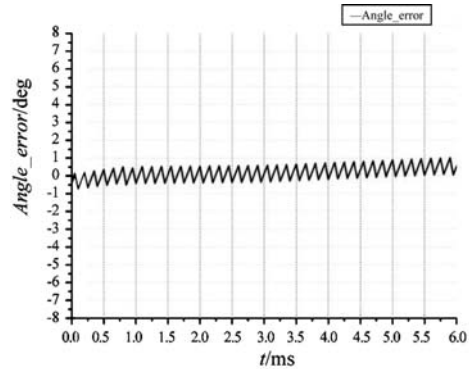


图14 采用零阶角度计算法的角度误差

本研究采用一阶角度计算法的估算转子位置与编码器计算转子位置的误差波形如图15所示。

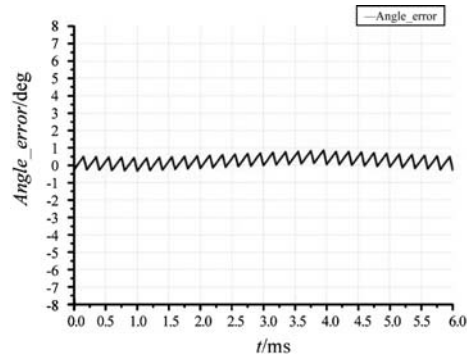


图15 采用一阶角度计算法的角度误差

由此可见,在电机低速运行状态下,采用一阶角度算法比零阶算法精度更高、误差更小。

电机三相霍尔位置传感器安装出现偏差时,本研究采用强制校正角度方式的转子位置波形及其误差如图16、图17所示。

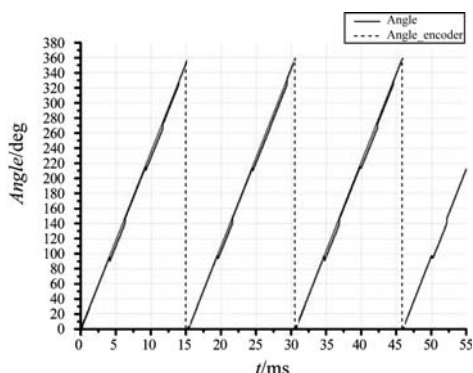


图16 强制校正角度时转子位置

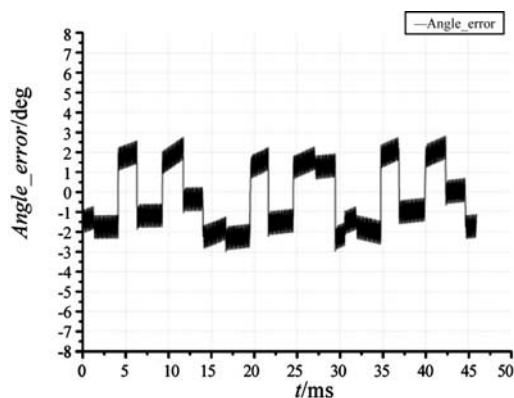


图17 强制校正角度时转子位置误差

由图16、图17可见,由于三相霍尔安装位置偏差,强制校正转子位置会导致区间切换时转子位置发生突变,转子位置误差也处在波动中,这对于电机的平稳运行是不利的。

与之相比,采用线性校正时的转子位置误差显示如图18所示。由此可见,采用这种方法可以有效消除转子位置的突变,并在一定程度上减小转子误差。

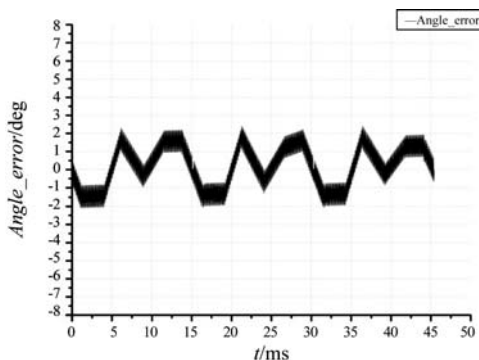


图18 线性校正角度时转子位置误差

本研究采用边界校正角自动修正后,并使用线性角度校正后的计算误差,边界校正角自动补偿后的转子位置误差如图19所示。

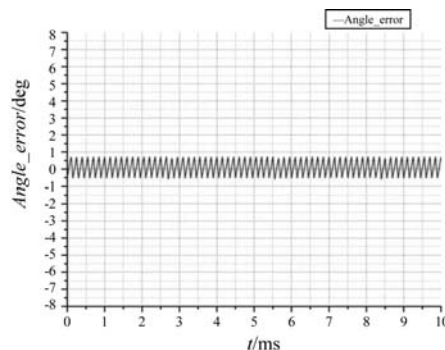


图19 边界校正角自动补偿后的转子位置误差

由图18、图19可见,当同时使用线性角度校正与校正角自动补偿后,已经基本消除了由于霍尔位置传感器安装位置偏差造成的转子位置测量误差,可以有效地提高其估算精度。

4 结束语

为了提高低分辨率位置传感器电机系统中的转子位置和转速估算精度,本研究提出了线性转子位置校正的方法以及自动边界位置补偿法。通过上述讨论与实验可知:加入加速度计算的一阶转子位置估算方法比一般的零阶估算方法误差更小;同时,对于不同速度,研究者通过采取灵活的转子位置估算策略,如可变的计算平均速度区间,可以有效改善计算的精度;而对于三相霍尔位置传感器安装位置存在偏差的情况,线性校正角度的方式可以减小角度突变,并在一定程度上减小估算误差,而边界位置自动补偿则可以有效抑制偏差,提高估算精度,对于多级数电机,有很大的实用价值。

该算法可以使系统的动态和稳态性能获得改善,并且可为今后该算法在电动汽车上的应用打下良好的基础。

参考文献(References):

- [1] 葛英辉,李春生,倪光正. 微型电动汽车用轮毂电机控制系统的研究[J]. 中小型电机,2003,30(2):34-37.
- [2] 邹继斌,徐永向,于成龙. 正弦波无刷直流电机的新型转子位置检测方法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(12):47-49.
- [3] 王 伊. 永磁同步电动机转子位置检测策略的研究[D]. 武汉:华中科技大学控制科学与工程系,2006.
- [4] 许振伟. 基于低分辨率传感器的PMSM伺服系统[J]. 电工技术学报,2004,19(10):38-41.
- [5] 王治国,荣 军,黄 海. 基于简单位置传感器永磁电机矢量控制策略的研究[J]. 船电技术,2008,28(3):155-158.
- [6] 王 伊,程善美. 采用低分辨率位置传感器的PMSM控制技术[J]. 河南科技大学学报:自然科学版,2006,27(3):11-13.

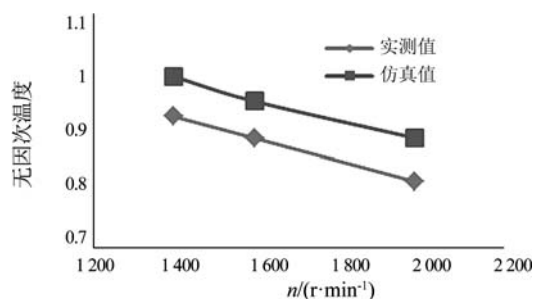


图12 进气格栅温度仿真与实测参数对比

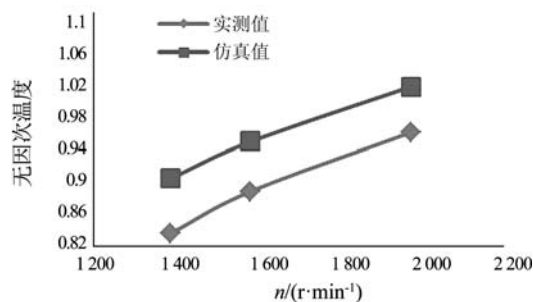


图13 舱内机顶温度仿真与实测参数对比

5 结束语

本研究以发动机热平衡试验和车载道路试验为基础,对商用客车发动机动力舱热状态进行了研究,主要结论如下:

(1)动力舱内冷却气流的最高温度区域均匀分布在发动机机体上方的机舱内,这主要是由于所研究车辆的冷却模块和发动机舱平行布置且有隔板隔离,冷却气流受到初步加热,在流经风扇后,受车尾后舱门板的导流,呈U形流经发动机舱,由于冷却模块出口的气流温度普遍低于发动机机体温度,与机体的对流换热和辐射换热使得舱内温度进一步上升;

(2)功率点工况下机体散热最显著,发动机舱温度显著上升,使得排气格栅处的气流温度普遍大于冷却模块出口处的气流温度;

(3)冷却模块处的气流温度均较舱内最高温度小,风道的隔离布置使动力舱的冷却风热回流得到有

效控制;

(4)影响动力舱热流分布的主要因素是中冷器、水散热器和发动机机体所释放的热量,因此,通过采取对动力舱进行高低温区隔离设计、将冷却气流和发动机舱分隔、屏蔽高温区等措施可有效控制其热流分布,防止局部温度过高而引起的系统部件工作失效。另外发动机运行负荷显著影响机体发热量的大小,对流经发动机舱的气流温度影响也较大。

参考文献(References):

- [1] 王世震. 汽车构造[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 成晓北,潘立,鞠洪玲. 现代车用发动机冷却系统研究进展[J]. 车用发动机,2008(1):1-7.
- [3] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [4] HUCHO W H. Aerodynamics of Road Vehicles[M]. 4th ed. SAE International, Warrendale, 1998.
- [5] 于莹潇,袁兆成,田佳林,等. 现代汽车热管理系统研究进展[J]. 汽车技术,2009(8):1-7.
- [6] 章慧锦,李仁业. 车辆冷却系统设计手册[M]. 北京:国防工业出版社,1984.
- [7] 陆国栋,俞小莉,张毅,等. 轮式装载机冷却组优化匹配的风洞试验[J]. 农业机械学报,2006,37(3):17-19,26.
- [8] HALLQVIST T. The Cooling Airflow of Heavy Trucks - a Parametric Study[N]. SAE Technical Paper,2008-01-1171.
- [9] 鲍积润,毕小平. 坦克动力舱空气流动与传热影响因素的仿真研究[J]. 装甲兵工程学院学报,2005,19(1):62-65.
- [10] 申建中,谭德高. 轻型货车发动机冷却系统匹配计算[C]. 2003年11省区市机械工程学学会学术会议论文集,2003.
- [11] 董增勇,李伟. 微型动静压轴承 FLUENT 仿真研究[J]. 轻工机械,2012,31(3):36-39.
- [12] 陈敏,邹锐锐,葛晓宏,等. 基于 FLUENT 的盘型塑件高光模具热响应研究[J]. 机电技术,2012(2):104-106.
- [13] WILLIAMS J, VEMAGANTI G. CFD Quality-A Calibration Study for Front-End Cooling Airflow [N]. SAE Transactions. 980039, 1998: 234-247.

[编辑:罗向阳]

(上接第529页)

- [7] CAPPONI F G, DE D G, DEL F L. Brushless AC Drive Using An Axial Flux Synchronous Motor With Low Resolution Position Sensors [C] // Proceedings of IEEE 35th Annual Power Electronics Specialist Conference Aachen: [s.n.], 2004:2288-2292.
- [8] CAPPONI F G, DE D G, DEL F L. AC Brushless Drive with Low Resolution Hall-Effect Sensors For An Axial Flux PM Machine [C] // Industry Application Conference, 39th IAS Annual Meeting Seattle: [s.n.], 2004:2382-2389.
- [9] MORIMOTO S, SANADA M, TAKEDA Y. Sinusoidal Current Drive System of Permanent Magnet Synchronous Motor with Low Resolution Position Sensor [C]. Industry Applications Conference, 31st IAS Annual Meeting San Diego [s.n.], 1996:9-14.
- [10] 董窃窃. 采用低分辨率位置传感器的正弦波永磁同步电机控制系统 [D]. 济南:山东大学电气工程学院, 2007: 6-11.

[编辑:李辉]