

基于非线性观测器的路面附着系数估计方法

丁惜瀛, 裴延亮, 张洪月, 于 华

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘 要: 提出了一种基于非线性观测器的路面附着系数估计方法。针对转向工况下路面附着系数的实时估计问题, 建立了车辆的非线性动力学模型, 构造了全维观测器, 以估算轮胎回正力矩。根据车辆的侧向动力学特性, 将车载传感器测量值与车辆模型输出值之间的偏差作为非线性观测器的 Luenberger 类型反馈项, 实现了对车载传感器的充分利用。通过李雅普诺夫 (Lyapunov) 稳定性分析, 确定了非线性观测器反馈环节的增益, 并在 Matlab/Simulink 仿真环境下对该方法进行了验证。仿真结果表明, 该估计方法在不同路况下具有较高的准确性。

关键词: 路面附着系数; 车辆模型; 轮胎回正力矩; 全维观测器; 非线性观测器

中图分类号: U461.91

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2012)05-0055-05

Estimation Approach of Road Friction Coefficient Based on Nonlinear Observer

DING Xi-ying, PEI Yan-liang, ZHANG Hong-yue, YU Hua

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China)

Abstract: In this paper, an algorithm for estimating road friction coefficient based on nonlinear observer is proposed. To solve the problem of the real-time estimation of road friction coefficient while steering, a nonlinear vehicle model is established, and a full-order observer is developed to estimate front tire aligning moment. According to the vehicle lateral dynamic characteristics, and the error between the measurements of vehicle sensors and the outputs of vehicle model as observer's Luenberger-type feedback terms, the vehicle sensors are fully used. By means of Lyapunov stability theory, the observer gain is confirmed, and the estimated algorithm is verified under Matlab/Simulink environment. The simulation results show that the estimated algorithm has a good performance under different road conditions.

Key words: road friction coefficient; vehicle model; tire aligning moment; full-order observer; nonlinear observer

0 引言

车辆行驶过程中所需要的驱动力、制动力、侧向力等, 产生于轮胎与路面之间的接触面, 而路面附着系数反映了接触面的信息。当路况较差、车速较高时, 驾驶员往往难以准确操纵车辆, 尤其是转向操作, 甚至会造成车辆失控。车辆主动安全系统能较好地解决这些问题^[1], 但当路面附着系数未知时, 主动安全系统的性能通常无法充分发挥^[2-3]。因此, 路面附着系数的信息对

于车辆控制系统的设计和分析十分重要, 特别是对于主动安全系统。

根据测量手段和测量参数的不同, 可以将路面附着系数估计算法分为两种: 基于原因 (Effect-based) 的估计方法和基于效果 (Cause-based) 的估计方法^[4]。基于原因的估计方法利用光学传感器、电磁波传感器等, 通过检测路面附着物质 (如水, 冰, 雪等), 估计路面附着系数。该方法的优点是, 在轮胎接触路面之前可以预先估计路面的附着系数; 缺点是, 不能反映影响路面附着系数的其他因素, 如轮胎气压、轮胎磨损等^[5-6]。基于效果的估计方法利用车辆和轮胎的动力学特性, 估计路面附着系数的大小。该方法的优点是, 可以充分利用车载传感器, 降低了成本。文献^[7]利用 μ -S 曲线斜率估

收稿日期: 2012-05-15

作者简介: 丁惜瀛 (1964-), 女, 教授, 博士, 研究方向为电动汽车牵引及安全性控制。

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目 (20092052); 沈阳市科技计划项目 (F12-277-1-11)

计路面附着系数,这种方法适用于小滑移率阶段,缺点是, $\mu - S$ 曲线斜率值还受轮胎气压等因素的影响,而且拟合曲线需要大量的数据,实时性不足。

针对车辆转向工况下路面附着系数的实时估计问题,本文提出了一种非线性观测器的估计方法,建立了车辆的非线性动力学模型,构造了全维观测器,以估算轮胎回正力矩。将车载传感器量测值与车辆模型输出值之间的偏差作为非线性观测器的Luenberger类型反馈环节,实时地估计路面附着系数。通过对观测器的稳定性分析,确定非线性观测器反馈环节增益。最后,在Matlab/Simulink仿真环境下校验了该方法的有效性。

1 车辆模型

车辆行驶过程中,由于转向、变道等操作,使车轮出现侧偏角,从而产生侧向力。当侧偏角较小时,车辆可以简化为单轨车辆模型(图1)。单轨车辆模型的侧向平移运动方程和横摆动力学方程分别为:

$$\begin{cases} m(\dot{v}_y + v_x r) = F_{yf} + F_{yr} \\ I_z \dot{r} = aF_{yf} - bF_{yr} \end{cases} \quad (1)$$

式中: m ——车辆总质量; v_x 、 v_y ——分别为车辆的纵向、侧向速度; r ——车辆横摆角速度; F_{yf} 、 F_{yr} ——分别为作用在前轴、后轴上的轮胎侧向力; I_z ——车辆横摆转动惯量; a 、 b ——分别为车辆质心到前轴、后轴的纵向距离。

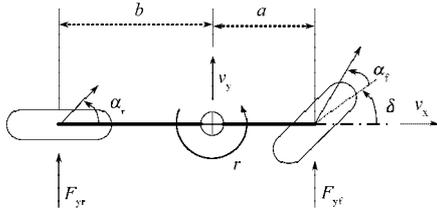


图1 单轨车辆模型

Fig. 1 Single track vehicle model

在小角度的假设下,前轮侧偏角 α_f 和后轮侧偏角 α_r 的关系为:

$$\begin{cases} \alpha_f = (v_y + ar) / v_x - \delta \\ \alpha_r = (v_y - br) / v_x \end{cases} \quad (2)$$

式中: δ ——前轮转向角(前轮转向角与方向盘转角近似为线性关系)。

对于式(1)中的轮胎侧向力,可以用Brush轮胎模型描述。与其他轮胎模型相比,Brush轮胎模型需要的参数较少,且能反映轮胎非线性特性。由于在转向工况下,车辆主要受侧向激励作用,故使用纯侧向滑移情况下的Brush轮胎模型^[8]。Brush轮胎模型中,轮胎侧向力 F_y 和轮胎回正力矩 τ_a 的表达式为:

$$\begin{cases} F_y = -3\mu F_z \rho_y (1 - |\rho_y| + \frac{1}{3}\rho_y^2) \\ \tau_a = \mu F_z c_p \rho_y (1 - |\rho_y|)^3 \end{cases}, \text{当} |\alpha| \leq |\alpha_{sl}| \text{时} \quad (3)$$

$$\begin{cases} F_y = -\mu F_z \text{sgn}(\alpha) \\ \tau_a = 0 \end{cases}, \text{当} |\alpha| > |\alpha_{sl}| \text{时}$$

式中: $\alpha_{sl} = \arctan(1/\theta_y)$, 其中 $\theta_y = 2c_p l^2 / (3\mu F_z)$, l 为轮胎接触印迹长度的一半; $\rho_y = \theta_y \sigma_y$ ($\sigma_y = \tan(\alpha)$); μ ——路面附着系数; α ——轮胎侧偏角; F_z ——轮胎法向载荷; c_p ——单位长度的侧偏刚度。

Brush轮胎模型侧向力、回正力矩特性曲线如图2所示。

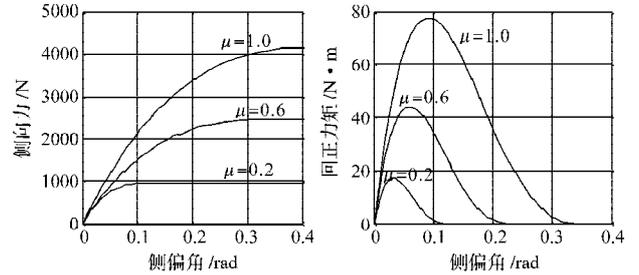


图2 Brush轮胎模型侧向力、回正力矩曲线

图2 Lateral force/self-aligning moment of Brush tire model
电动助力转向系统模型的数学表达式如下:

$$J_{\text{eff}} \ddot{\delta} + b_{\text{eff}} \dot{\delta} + k\delta = \tau_a + \tau_s + \tau_m + \tau_f \quad (4)$$

式中: J_{eff} ——等效转动惯量; b_{eff} ——转向系统的等效阻尼系数; k ——扭转刚度; τ_s ——方向盘上施加的转矩; τ_m ——电机输出转矩; τ_f ——摩擦转矩。

方向盘上施加的转矩 τ_s 可由位于转向柱的转矩传感器获得; 摩擦转矩 τ_f 可以通过库伦摩擦模型估计得到。对于直流电动机,电机转矩 τ_m 与有效电枢电流 i_{eff} 具有如下关系:

$$\tau_m = K_m i_{\text{eff}} \quad (5)$$

式中: K_m ——电磁转矩常数。

2 轮胎回正力矩的估算

由Brush轮胎模型可知,轮胎回正力矩可由式(3)计算。但对于实车而言,轮胎回正力矩很难直接测量。因此,只能利用现有的车载传感器,通过其他途径间接估算。轮胎回正力矩是缓慢变化的,可表示为:

$$\dot{\tau}_a = 0 \quad (6)$$

因此可以将式(4)、式(6)表示为状态方程的形式:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (7)$$

式中: $x = [\delta \quad \dot{\delta} \quad \tau_a]^T$; $u = [i_{\text{eff}} \quad \tau_s - \tau_f]^T$;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b_{\text{eff}}}{J_{\text{eff}}} & \frac{1}{J_{\text{eff}}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{K_m}{J_{\text{eff}}} & \frac{1}{J_{\text{eff}}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; C = [1 \ 0 \ 0]$$

由于状态方程(7)所对应的系统 $\Sigma(A, B, C)$ 具有能观性,满足全维观测器存在的条件。按照全维观测器设计步骤,采用极点配置算法,确定观测器的增益 L ,保证观测器估计误差的收敛性。全维观测器的结构框图如图3所示,所设计的全维观测器如下:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= (A-LC)\hat{x} + Bu + Ly \\ \hat{\tau}_a &= [0 \ 0 \ 1]\hat{x} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

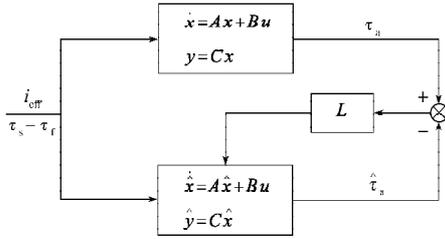


图3 全维观测器结构框图

Fig. 3 Structure diagram of the full-order observer

3 基于非线性观测器的路面附着系数估计

3.1 非线性观测器的设计

由式(1)和式(2)可得:

$$\dot{\alpha}_f = \left(\frac{1}{mv_x} + \frac{a^2}{I_z v_x} \right) F_{yf} + \left(\frac{1}{mv_x} - \frac{ab}{I_z v_x} \right) F_{yr} - r - \dot{\delta} \quad (9)$$

式中 F_{yf} 和 F_{yr} 是关于 α_f 和 μ 的函数。

路况未发生突变时,路面附着系数为常数:

$$\dot{\mu} = 0 \quad (10)$$

量测方程如下:

$$y = [ma_y \ \tau_a]^T \quad (11)$$

式中: a_y ——车辆侧向加速度(可由加速度传感器测得); τ_a ——轮胎回正力矩(可由全维观测器式(8)估算)。

由Brush轮胎模型侧向力、回正力矩曲线可知,路面附着系数不同,轮胎侧向力、回正力矩特性也不同(图2)。因此,采用侧向力、回正力矩的测量值与车辆模型的输出值之间的偏差作为非线性观测器的Luenberger类型反馈项,非线性观测器设计如下:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{\alpha}}_f &= \left(\frac{1}{mv_x} + \frac{a^2}{I_z v_x} \right) \hat{F}_{yf} + \left(\frac{1}{mv_x} - \frac{ab}{I_z v_x} \right) \hat{F}_{yr} - r - \dot{\delta} + \\ & L_{11} \left(ma_y - \left(\hat{F}_{yf} + \hat{F}_{yr} \right) \right) + L_{12} \left(\tau_a - \hat{\tau}_a \right) \\ \dot{\hat{\mu}} &= L_{21} \left(ma_y - \left(\hat{F}_{yf} + \hat{F}_{yr} \right) \right) + L_{22} \left(\tau_a - \hat{\tau}_a \right) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: L_{11} 、 L_{12} 、 L_{21} 和 L_{22} ——分别为观测器反馈项增益参数。

3.2 非线性观测器增益的确定

将式(9)、式(10)和式(12)改写为增广矩阵形式:

$$\left. \begin{aligned} \dot{z} &= F(z, u) \\ \dot{\hat{z}} &= F(\hat{z}, u) + L(\hat{z}, u)(H(z, u) - H(\hat{z}, u)) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中:

$$z = [\alpha_f, \mu]^T; \quad \hat{z} = [\hat{\alpha}_f, \hat{\mu}]^T;$$

$$F(z, u) = \begin{bmatrix} f(\alpha_f, u, \mu) \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{mv_x} + \frac{a^2}{I_z v_x} \right) F_{yf} + \left(\frac{1}{mv_x} - \frac{ab}{I_z v_x} \right) F_{yr} - r - \dot{\delta} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$F(\hat{z}, u) = \begin{bmatrix} f(\hat{\alpha}_f, u, \hat{\mu}) \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{mv_x} + \frac{a^2}{I_z v_x} \right) \hat{F}_{yf} + \left(\frac{1}{mv_x} - \frac{ab}{I_z v_x} \right) \hat{F}_{yr} - r - \dot{\delta} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$H(z, u) = \begin{bmatrix} h_1(\alpha_f, u, \mu) \\ h_2(\alpha_f, u, \mu) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ma_y \\ \tau_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{yf} + F_{yr} \\ \tau_a \end{bmatrix};$$

$$H(\hat{z}, u) = \begin{bmatrix} h_1(\hat{\alpha}_f, u, \hat{\mu}) \\ h_2(\hat{\alpha}_f, u, \hat{\mu}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{F}_{yf} + \hat{F}_{yr} \\ \hat{\tau}_a \end{bmatrix};$$

$$L(\hat{z}, u) = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix}。$$

令 $e = z - \hat{z}$,由式(13)可得到观测器的误差方程:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= F(z, u) - F(\hat{z}, u) - L(\hat{z}, u)(H(z, u) - H(\hat{z}, u)) = \\ & A(z, u)e + r_1(z, e, u) - L(\hat{z}, u)(C(z, u)e + r_2(z, e, u)) = \\ & (A(z, u) - L(\hat{z}, u)C(z, u))e + r_1(z, e, u) - L(\hat{z}, u)r_2(z, e, u) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $A(z, u) = \frac{\partial F(z, u)}{\partial z}$; $C(z, u) = \frac{\partial H(z, u)}{\partial z}$;

$$r_1(z, e, u) = F(z, u) - F(\hat{z}, u) - A(z, u)e;$$

$$r_2(z, e, u) = H(z, u) - H(\hat{z}, u) - C(z, u)e。$$

选择观测器反馈环节增益参数如下:

$$L_{11} = \left(k_1 \frac{\partial h_1}{\partial \alpha_f} + \frac{\partial f}{\partial \alpha_f} / \frac{\partial h_1}{\partial \alpha_f} \right)_{\alpha_f = \hat{\alpha}_f, \mu = \hat{\mu}}; \quad L_{12} = k_2 \left(\frac{\partial h_2}{\partial \alpha_f} \right)_{\alpha_f = \hat{\alpha}_f, \mu = \hat{\mu}};$$

$$L_{21} = k_3 \left(\frac{\partial h_1}{\partial \mu} \right)_{\alpha_f = \hat{\alpha}_f, \mu = \hat{\mu}}; \quad L_{22} = k_4 \left(\frac{\partial h_2}{\partial \mu} \right)_{\alpha_f = \hat{\alpha}_f, \mu = \hat{\mu}}; \quad k_1, k_2, k_3, k_4 > 0。$$

构造李雅普诺夫函数:

$$V(z, e, u) = e^T P e \quad (15)$$

取 $P=I$,求李雅普诺夫函数的一阶偏导数:

$$\dot{V}(z, e, u) = \frac{de^T}{dz} P e + e^T \frac{d}{dz} (P e) = \dot{e}^T P e + e^T P \dot{e} \quad (16)$$

将式(14)代入式(16), 整理得:

$$\dot{V}(z, e, u) = -e^T Q e + (r_1 - L r_2)^T P e + e^T P (r_1 - L r_2) \quad (17)$$

式中, $Q = -(A - LC)^T P - P(A - LC)$ 。

$F(z, u)$ 、 $H(z, u)$ 对于 z 是连续可微的, 且 $(r_1 - L r_2)$ 是关于 e 的泰勒级数展开式的二次项及高阶项, 故:

$$\lim_{\|e\| \rightarrow 0} \frac{\|r_1(z, e, u) - L r_2(z, e, u)\|}{\|e\|} = 0 \quad (18)$$

则式(17)具有如下关系:

$$\lim_{\|e\| \rightarrow 0} \dot{V} \leq \lim_{\|e\| \rightarrow 0} \left(-\lambda_{\min}(Q) + 2 \frac{\|r_1 - L r_2\|}{\|e\|} \|P\| \right) \|e\|^2 = \lim_{\|e\| \rightarrow 0} (-\lambda_{\min}(Q)) \|e\|^2 \quad (19)$$

可以证明 Q 的最小特征值 > 0 , 故 $\lim_{\|e\| \rightarrow 0} \dot{V} \leq \lim_{\|e\| \rightarrow 0} (-\lambda_{\min}(Q)) \|e\|^2 < 0$ 成立, 观测器满足李雅普诺夫稳定性条件。

4 仿真分析

4.1 仿真参数

为了验证上述估计方法的有效性, 利用Carsim软件构建了实车模型, 在Simulink仿真环境中构建了车辆模型及非线性观测器, 然后将Carsim构造的实车模型导入到Simulink中, 实现Carsim与Simulink之间的联合仿真。车辆参数见表1, 非线性观测器增益参数见表2。

表1 车辆参数
Tab. 1 Vehicle parameters

项目	参数	项目	参数
m/kg	1412	h/m	0.54
a/m	1.016	$I_z/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	1 523
b/m	1.562	$c_p/\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	790 000
l/m	0.178		

表2 非线性观测器增益参数
Tab. 2 Gain parameters of nonlinear observer

项目	参数	项目	参数
k_1	2.5×10^{-9}	k_3	1.8×10^{-8}
k_2	2.8×10^{-6}	k_4	1.9×10^{-4}

4.2 仿真结果

为了校验估计算法的有效性, 分别在路面附着系数为0.5(湿沥青路面)和0.8(干混凝土路面)的路况下进行仿真, 车速为60 km/h, 方向盘转角输入如图4所示, 仿真结果如图5、图6所示。

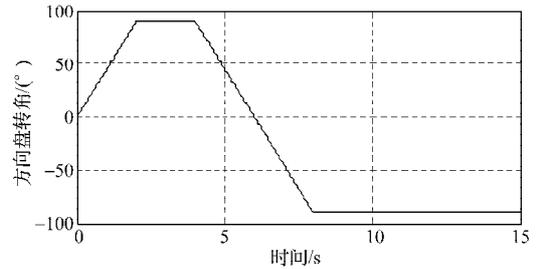
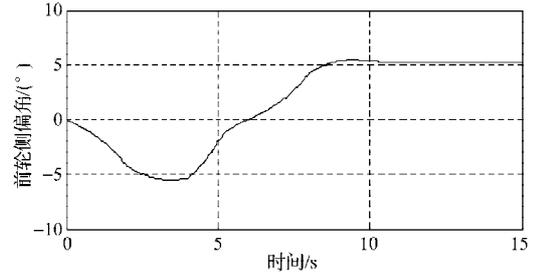


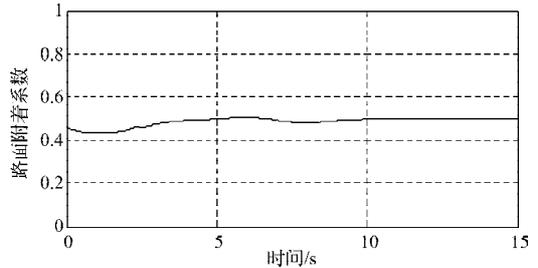
图4 方向盘转角

Fig. 4 Steering wheel angle



(a) 前轮侧偏角

(a) Front tire slip angle

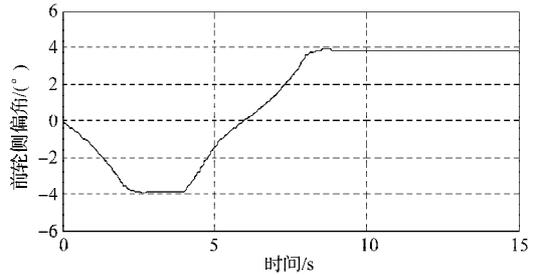


(b) 路面附着系数

(b) Road friction coefficient

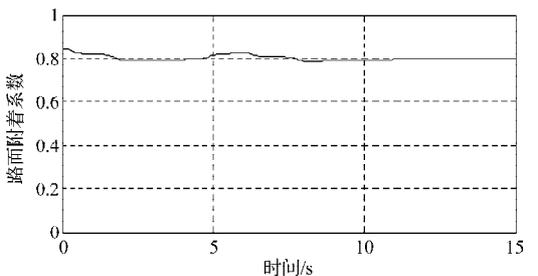
图5 路面附着系数为0.5时的估计结果

Fig. 5 Estimated results while the road friction coefficient is 0.5



(a) 前轮侧偏角

(a) Front tire slip angle



(b) 路面附着系数

(b) Road friction coefficient

图6 路面附着系数为0.8时的估计结果

Fig. 6 Estimated results while the road friction coefficient is 0.8

由图5、图6可看出,转向工况下,该估计方法能够较准确地估计出路面附着系数。在湿沥青路况下,路面附着系数的估计值在4.5 s时收敛于真实值;而在干混凝土路况下,路面附着系数的估计值在2 s时收敛于真实值,说明该估计方法在高附着系数路面的收敛速度比低附着系数路面的收敛速度快。虽然路面附着系数的估计初值与真实值存在一定偏差,且受模型非线性等因素影响,但由于引入了反馈环节,估计值逐渐趋于真实值,估计误差最大在5%左右,在误差容许范围内。

5 结语

本文针对转向工况下路面附着系数的实时估计问题,利用不同附着系数路面的轮胎侧向力、回正力矩特性不同的特点,根据车辆的侧向动力学特性,设计了具有Luenberger类型反馈环节的非线性观测器,并利用车载传感器测量值与车辆模型输出值之间的偏差作为观测器的反馈项。仿真结果表明,该方法基本达到了估计目标。但转向过程中,同时加速或制动的情况并未考

虑,还需进一步的研究。

参考文献:

- [1] 胡爱军,王朝晖. 汽车主动安全技术[J]. 机械设计与制造, 2010(7): 97-99.
- [2] 丁惜瀛,张钦爽,覃艳丽. 基于转矩分配的电动汽车横摆稳定性控制[J]. 大功率变流技术, 2011(5): 41-44.
- [3] 赵林辉,刘志远,陈虹. 一种车辆状态的非线性估计方法研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(6): 1710-1715.
- [4] 余卓平,左建令,张立军. 路面附着系数估算技术发展现状综述[J]. 汽车工程, 2006, 28(6): 546-549.
- [5] Sierra C, Tseng E, Peng H. Cornering stiffness estimation based on vehicle lateral dynamics[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(1): 24-38.
- [6] Gridsada P. State, parameter, and unknown input estimation problems in active automotive safety applications[D]. Minnesota: Univ. of Minnesota, 2011.
- [7] Phanomchoeng G, Rajamani R. Real-time automotive slip angle estimation with nonlinear observer[C]//Proceedings of the American Control Conference. San Francisco, 2011.
- [8] Hans B P. Tyre and Vehicle Dynamics[M]. 2th ed. Oxford, UK: Elsevier, 2006.

(上接第33页)

图8示出地铁车辆速度为20 km/h、热管材料的轴向导热系数分别为2 000、5 000、10 000和20 000 W/m·°C工况下IGBT芯片最高温度的变化曲线。可以看出,最高温度的上升幅度随着轴向导热系数的降低而增大。根据元器件降额使用的经验,芯片的最高温度应尽量低于其极限温度(125 °C或150 °C)的70%~80%。从图8的变化趋势可知,如果热管的性能继续恶化,导热系数将进一步降低,IGBT芯片的最高温度将超过其允许的结温。因此,在使用热管散热器时,必须保证热管的质量,以确保散热性能满足设计要求。

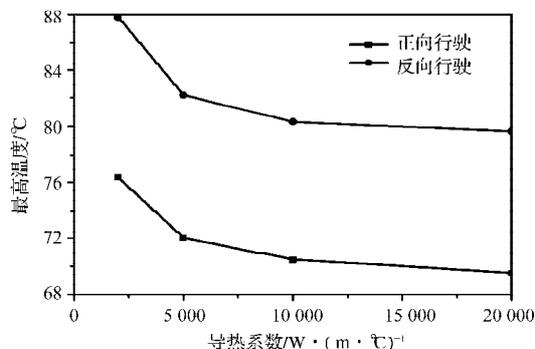


图8 导热系数对温度的影响

Fig.8 Effects of thermal conductivity on chip temperature

以上稳态热仿真结果分析表明,在较低运行速度下,地铁车辆热管散热器仍具有较好的散热效果。

4 结语

在变流器产品设计时,运用CFD方法进行热分析,有助于提高产品的可靠性,提升设计水平和研发能力。目前,配备了热管散热器的牵引变流器已在上海地铁1号线、北京地铁房山线、深圳地铁5号线、沈阳地铁2号线、重庆地铁6号线等多个国产化地铁车辆项目中得到大量应用,且运行状况良好^[5],证明了热管散热器可满足使用要求,同时也验证了仿真结果的准确性。由于地铁车辆上(下)行时间约为30 min,需停靠10余个站点,每站约停20 s,起停频繁,IGBT元件的损耗是变化的,走行风速有快有慢,因此热管散热器热分析属于典型的瞬态热分析问题,后续我们将对这项工作进一步的研究。

参考文献:

- [1] 赵振波,陈子颖. IPOSIM-IGBT仿真工具在变频器设计中的应用[J]. 变频器世界, 2007(5): 83-87.
- [2] Wintrich A. 转换器设计用在线式免费仿真软件——SemiSel[J]. 变频器世界, 2006(12): 81-84.
- [3] 丁杰,李江红,陈燕平,等. 流动状态与热源简化方式对IGBT水冷板仿真结果的影响[J]. 机车电传动, 2011(5): 21-25.
- [4] 刘海涛. 地铁车辆用DC 1 500 V IGBT牵引逆变器[J]. 机车电传动, 2008(5): 42-44.
- [5] 翁星方,忻力,胡家喜,等. 简化地铁车辆IGBT牵引逆变器[J]. 机车电传动, 2011(3): 44-48.