

永磁式缓速器转子鼓的瞬态温度场分析

赵万忠, 何仁, 刘成晔

(江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

摘要: 该文运用传热学原理建立了车用永磁式缓速器转子鼓瞬态温度场的计算模型, 确定了合理的边界条件, 同时考虑了对流换热和辐射换热。利用 Galerkin 法推导温度场的有限元方程, 采用无条件稳定的 Galerkin 格式离散时间微分项, 迭代控制采用新型的变时间步长法, 分析了转子鼓的瞬态温度场, 同时分析了径向和轴向方向的温度与时间的分布规律, 并对轴向温度分布进行了试验研究, 结果表明试验值与采用有限元计算的理论值吻合较好。采用温度场分析可以优化转子鼓设计, 减小转子鼓温度和温度梯度, 从而降低转子鼓的热应力与热变形, 有效地提高了永磁式缓速器的制动稳定性。

关键词: 永磁式缓速器; 转子鼓; 温度场; 数值分析; 有限元

中图分类号: U 463.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2006)05-0090-05

赵万忠, 何仁, 刘成晔. 永磁式缓速器转子鼓的瞬态温度场分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 90-94.

Zhao Wanzhong, He Ren, Liu Chengye. Analysis of non-stationary thermal field of rotor of permanent magnet retarder [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5): 90-94. (in Chinese with English abstract)

0 引言

目前农用车辆的汽车制动方式是在车轮上安装机械式摩擦制动器, 但频繁或长时间制动会造成制动鼓(鼓)和摩擦片(制动衬片)过热, 导致制动效能衰退, 甚至制动失效。加装缓速器可以较好的解决这些问题, 它可以使行驶车辆(特别是下长坡的车辆), 速度降低或稳定在一定速度范围^[1]。加装缓速器的农用车辆, 可大大降低制动器的负担和制动片温度, 增加制动器的使用寿命和汽车行驶的安全性^[2]。

由于农用车辆比重型卡车、大型客车装载量小。农用车辆的这些特点, 决定了它适合装质量和体积较小的缓速器。永磁式缓速器成为其首选的辅助制动装置, 因为永磁式缓速器可实现大幅度的轻量化、小型化; 几乎不消耗电力(仅电磁阀耗电); 连续使用自身不会产生过热, 能持续不断保持制动力的稳定性和持久性; 在高速范围内制动力也不会降低, 且传动轴转速越高, 制动力越大。保养简单, 只需定期检查空气间隙即可。永磁式缓速器的这些优点使其在农用车辆上具有良好的发展前景。

永磁式缓速器国内对其研究很少, 还局限于产品介绍的层次上, 缺少理论分析。由于转子鼓温度对永磁式缓速器的性能影响较大, 因此有必要深入了解其温度变化。随着计算机技术的不断发展, 有限元方法已经成为解决瞬态温度场的主要手段。本文针对永磁式缓速器实际工况建立了转子鼓瞬态温度场计算模型, 同时考虑了对流换热和辐射换热。利用无条件稳定的 Galerkin 格式离散时间微分项, 在给定初始温度分布的基础上采用

新型的变时间步长法分析转子鼓瞬态温度场的变化。

1 永磁式缓速器结构与工作原理

永久磁铁缓速器包括两个部分: 转子和定子, 其中定子由永磁体和磁铁保持架组成。永磁式缓速器工作原理: 永磁式缓速器制动时, 旋转的转子鼓由于其内部形成无数个闭合导线所包围的面积内的磁通量就发生变化, 从而在转子鼓内部产生无数涡旋状的感应电流, 即涡电流, 如图 1 所示。一旦涡电流产生后, 磁场就会对带电的转子鼓产生阻止其转动的阻力及阻力矩, 从而起到缓速或制动作用。

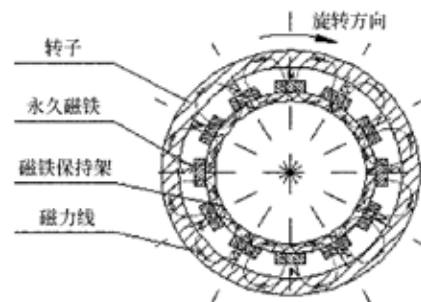


图 1 永磁式缓速器结构原理

Fig. 1 Magnetic field of permanent magnet retarder

2 转子鼓瞬态温度场计算模型

永磁式缓速器制动时转子鼓上产生涡流, 涡流的热效应将会产生焦耳热。由涡流理论可知: 涡流产生在转子鼓内表面, 而且涡流具有集肤效应。所以转子鼓可以分为两个部分: 一部分是转子鼓内侧, 即涡流区, 也就是内热源区; 另一部分就是转子鼓外侧, 即无涡流区或无内热源区。为研究方便假设在转子鼓内存在一虚拟边界, 虚拟边界把转子鼓分为两部分即内热源区和无内热源区^[3]。为建立瞬态温度场的计算模型, 作如下假设:

① 假设材料导热系数、表面对流换热系数、比热等

收稿日期: 2005-06-02 修订日期: 2005-08-04

基金项目: 江苏省科技攻关项目(BE2003-042)

作者简介: 赵万忠, 男, 主要从事汽车设计理论的研究。镇江

江苏大学汽车与交通工程学院, 212013. Email: zhaowanzhong

@126.com

不随温度变化, 对其作常量处理;

② 假设转子鼓内热源在等效集肤深度范围内均匀分布, 即虚拟边界把转子鼓严格分为内热源区与无内热源区;

③ 假设内热源为常量, 不随温度与时间变化。

2.1 数学模型

转子鼓结构为鼓形, 由于转子鼓的对称性, 其内热源分析和对流辐射边界条件均为轴对称, 计算模型可以等效为一个长、宽、高分别为转子鼓内表面周长、宽度、厚度的平板模型。转子鼓结构及其等效模型如图 2 所示。

由图 2 转子鼓温度场等效计算模型可知, 计算区域分成两部分: 一是无内热源区 D_1 ; 一是在等效集肤深度范围内的内热源区 D_2 。

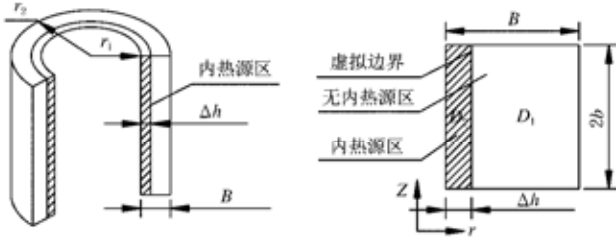


图 2 转子鼓结构及其等效计算模型
Fig. 2 Structure and equivalent model of rotor

2.2 物理条件

2.2.1 等效透入深度

永磁式缓速器制动时, 将在转子鼓内表面的一定深度内产生涡流。这个深度就是涡流等效透入深度, 涡流在实心转子中的透入深度通常是很小的, 且透入深度随转子鼓转速提高而降低。

$$\Delta_h = \sqrt{2/\omega\mu\sigma} \quad (1)$$

式中 Δ_h ——涡流等效透入深度, m; μ ——磁导率。且 $\mu = \mu_r \mu_0$, 其中 μ_r 、 μ_0 分别为相对磁导率和真空磁导率; σ ——转子鼓的电导率, 且 $\sigma = 1/\rho$, S/m; ρ ——转子鼓电阻率, m/S; ω ——转子鼓的转动角速度, rad/s。

2.2.2 内热源强度

求解瞬态温度场必须求解出内热源强度, 永磁式缓速器的内热源是涡流消耗在转子鼓上的焦耳热:

$$dP = \frac{E^2}{dR} = \frac{(\sqrt{2}Bb\omega r)^2}{2\rho b/\Delta_h dr} = \frac{B^2 b \omega^2 r^2 \Delta_h dr}{\rho} \quad (2)$$

式中 R ——转子鼓的电阻, Ω ; a 、 b ——永磁铁周向和轴向长度, m; E ——转子鼓平均感应电动势, V; B ——磁通密度, T。

单位体积的焦耳热(内热源强度)为

$$dq_v = \frac{dP}{V} = \frac{B^2 b \omega^2 r^2 \Delta_h dr}{\rho \cdot 32ab\Delta_h} = \frac{B^2 \omega^2 r^2 dr}{\rho \cdot 32a} \quad (3)$$

转子鼓内热源区的等效内热源

$$q_v = \int_0^{\Delta_h} \frac{B^2 \omega^2 r^2 dr}{\rho \cdot 32a} = \frac{256B^2 \omega^2 a^2}{\rho} \quad (4)$$

3 有限元模型

3.1 控制方程

无内热源区的瞬态温度场控制方程^[4-6]:

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho C} \left[\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right] \quad (5)$$

内热源区的瞬态温度场控制方程

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho C} \left[\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} + \frac{Q}{\lambda} \right] \quad (6)$$

3.2 边界条件

3.2.1 复合边界条件

转子鼓的内外表面及转子鼓两侧, 存在对流换热和辐射换热。如图 2 所示, D_1 区的上下表面和左侧存在对流边界条件和辐射边界条件, D_2 区的上下表面和右侧存在对流边界条件和辐射边界条件。

$$-\lambda \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=0} = h(T_1 - T_\infty) + \epsilon\sigma(T_1 \Big|_{z=0}^4 - T_{sur}^4) \quad (7)$$

$$-\lambda \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=2b} = h(T_1 - T_\infty) + \epsilon\sigma(T_1 \Big|_{z=2b}^4 - T_{sur}^4) \quad (8)$$

$$-\lambda \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=0} = h(T_2 - T_\infty) + \epsilon\sigma(T_2 \Big|_{z=0}^4 - T_{sur}^4) \quad (9)$$

$$-\lambda \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=2b} = h(T_2 - T_\infty) + \epsilon\sigma(T_2 \Big|_{z=2b}^4 - T_{sur}^4) \quad (10)$$

$$-\lambda \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=0} = h(T_2 - T_\infty) + \epsilon\sigma(T_2 \Big|_{r=0}^4 - T_{sur}^4) \quad (11)$$

$$-\lambda \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=B_0} = h(T_2 - T_\infty) + \epsilon\sigma(T_2 \Big|_{r=B_0}^4 - T_{sur}^4) \quad (12)$$

3.2.2 接触边界条件(虚拟边界条件)

接触边界条件即第四类边界条件, 内热源区及无内热源区的温度、热流密度都相等。

$$T_1(\tau, r, z) \Big|_{r=r_1} = T_2(\tau, r, z) \Big|_{r=r_1} \quad (13)$$

$$\lambda \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = \lambda \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_1} \quad (14)$$

3.3 初始条件

$$T_2(\tau, r, z) \Big|_{\tau=0} = Const \quad (15)$$

4 控制方程的离散

4.1 Galerkin 差分格式

平面温度场的变分计算基本方程(在无内热源区 D_1 设定 Q 为零)

$$\frac{\partial J^D}{\partial T_l} = \iint_b k r \left[\frac{\partial W_l}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W_l}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \rho C W_{lr} \frac{\partial T}{\partial \tau} - Q W_{lr} dx dr - \int_{\Gamma} k W_{lr} \frac{\partial T}{\partial n} ds = 0 \quad (16)$$

($l = 1, 2, \dots, n$)

式中 D ——转子鼓区域; Γ ——表示边界; W_l ——加权函数。

采用 Galerkin 格式计算瞬态温度场的基本方程:

$$\left[2[K] + \frac{3}{\Delta t}[N] \right] \{T\}_t = (2\{P\}_t + \{P\}_{t-\Delta t}) + \left[\frac{3}{\Delta t}[N] - [K] \right] \{T\}_{t-\Delta t} \quad (17)$$

这种格式具有较高的精度,且无条件稳定,这种差分格式明显优于C-N等其它格式^[7]。

4.2 变时间步长控制

由于永磁式缓速器转子鼓的温度在初始制动阶段温度时间变化率较大,持续制动一段时间后温度变化趋缓,本文采用的变时间步长法通过求解区域内最大温度对时间的梯度与预定义的标准温度对时间梯度之间的关系修正时间步长,从而达到自动调节时间步长的目的^[8,9]。

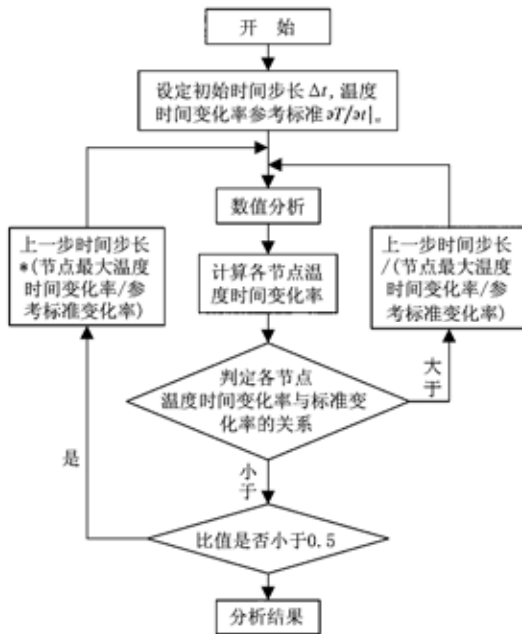


图3 变时间步长控制策略

Fig. 3 Control strategy of time-varying step

5 结果分析

本文采用的是四边形四节点网络离散,在两个区域里分别生成 10×100, 50×100 四边形网格。经过有限元分析得到沿转子鼓整个表面的不同时间的温度云图,如图4所示。700 s时的轴向和周向云图分别如图5和图6所示。轴向和径向节点温度与时间的变化曲线如图7所示。

由图4可知,随着时间增加温度云图也在发生变化。时间较小时,转子鼓温度较低,在转子鼓与环境温差较小时,二维模型内、外柱面散热量较小,此时的温度云图基本上呈现出一维状态,这时各表面的等效对流换热系数远大于内、外柱面的对流换热系数、辐射换热系数。随着时间的增加,温度也进一步加大,各表面散发在空气的热量不再可以忽略,从而对整个子午面温度场产生影响,使得温度等高线呈二次双曲线分布状态。

图5和图6分别是700 s时轴向和周向的热流云图。由图5可知,在轴向上热流是不均匀的,这是因为在转子鼓表面上考虑了其对流换热和辐射换热。同时发现在轴向上,越往中间热流越呈一维状态,靠近两侧热流呈二次双曲线分布状态,这是因为两侧的热流受对流和

辐射换热影响大,而越往中间受影响程度越小。由图6可知,热流在周向上基本呈现一维状态,这是因为在周向上由于转子鼓是筒式的,所以周向上的热流是对称的。

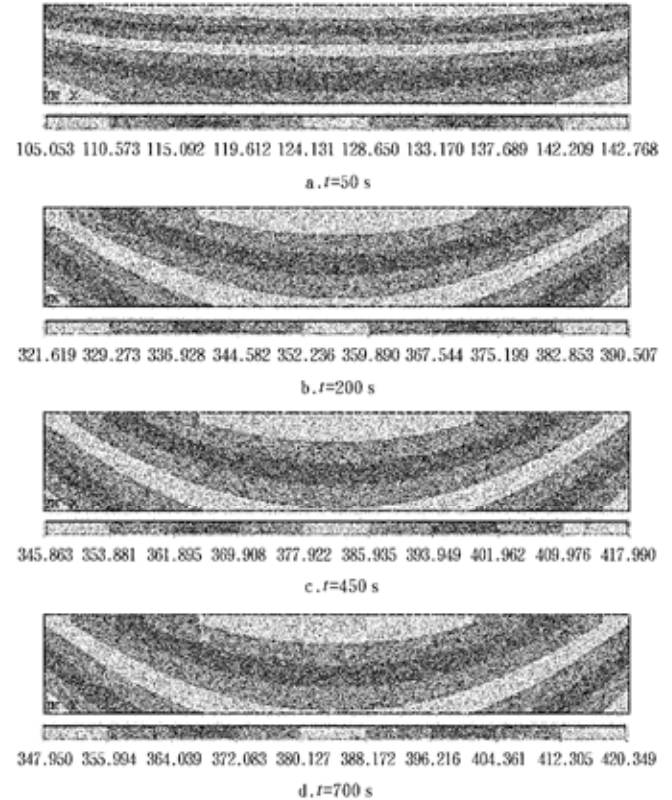


图4 转子鼓的温度云图

Fig. 4 Temperature nephogram of rotor

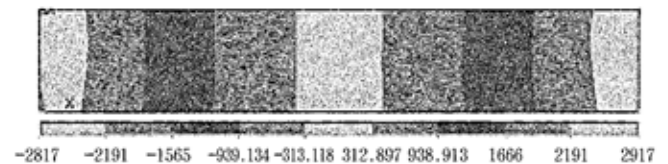


图5 轴向热流云图

Fig. 5 Axial thermal flow nephogram of rotor

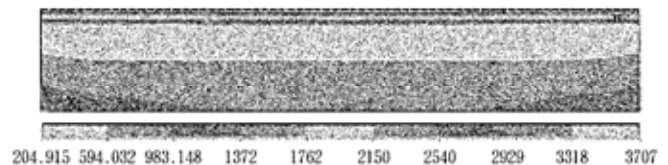


图6 周向热流云图

Fig. 6 Circumferential thermal flow nephogram of rotor

图7为沿径向和轴向节点温度时间变化关系,从图中可见,在初始制动阶段径向各节点的温度升高很快,随着时间的增加温度增加越来越慢。当时间增加到800 s左右时,温度已经基本稳定。这是由于缓速器初始状态时温度较低,随着时间的增加制动力矩增加很快,转子鼓上的内热源强度较大从而导致温度上升较快,当

温度上升到一定温度时,制动力矩减小^[10],从而导致温度梯度减小,另一方面随着转子鼓温度的增加,转子鼓表面与外界的对流换热与辐射换热越来越明显。

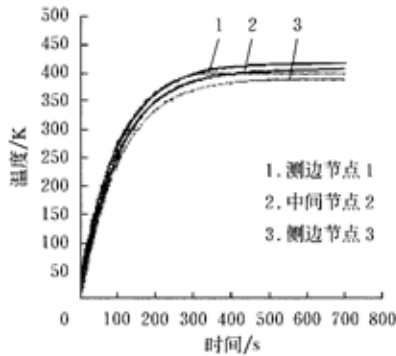


图 7 径向四节点与轴向三节点温度-时间曲线

Fig. 7 Curve of temperature-time of three axial nodal points

6 台架试验

本文计算了车用永磁式缓速器 1000 r/min 时温度分布。其结构参数如下:转子鼓的外径 r_2 为 222 mm;内径 r_1 为 212 mm;厚度为 10 mm。外界环境温度为 293 K。转子鼓材料为电工纯铁,其物性参数见表 1。

表 1 转子鼓材料物性参数表

Table 1 Parameters of rotor material

物性参数	数值
电导率/ $S \cdot m^{-1}$	0.6×10^7
相对磁导率	4000
热传导系数/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	54.7
热扩散率/ $m^2 \cdot s^{-1}$	23.1×10^{-6}
比热容/ $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	574
密度/ $kg \cdot m^{-3}$	7870

欧洲标准 ECE-R13 规定车辆在坡度为 6% 或 7% 的长 6 km 道路上采用缓速器制动,车辆应保持在 30 km/h 速度行驶,因此试验时选择主轴转速为 1000 r/min。为测量方便,利用台架试验对轴向上的三个测点进行了测定,通过温度传感器测定了不同时刻的三个测点的温度,并将它与对应时间的有限元理论计算数值进行比较,比较结果如表 2 所示。

表 2 有限元计算数值与试验数据的比较

Table 2 Comparison of results of the FEM and the test K

名称	时间/s					
	100	200	300	400	500	600
试验值 1	270	360	399	405	409	410
计算值 1	275	365	400	415	420	424
相对误差 1	1.8%	1.4%	0.25%	2.6%	2.7%	3.3%
试验值 2	250	351	390	400	403	404
计算值 2	242	354	389	405	415	419
相对误差 2	3.3%	0.85%	2.3%	1.2%	2.9%	3.6%
试验值 3	240	330	370	380	382	383
计算值 3	235	345	378	390	395	400
相对误差 3	2.12%	4.34%	2.11%	2.56%	3.30%	3.75%

本章采用了 Galekin 离散、变步长计算的热-应力耦合分析,为了减小误差,有限元计算中采用了变物性参数的处理方法。由表 1 可知,计算数值能够很好地逼近试验值,误差不超过 3.75%,这说明这种有限元方法具有较高的精度,比运用通常的解析法和有限元计算结果的精度要高得多。

当然有限元计算误差仍然存在,而且随着时间的增加,误差有增大趋势。这是因为,随着时间的增加,温度上升,气流对温度影响越来越明显,这种影响随着转速增大而增大。不过由于本文的转速不大,由于内热源很大,因此这种影响甚微。由试验结果可知 700 内最大误差也只有 3.75%。

7 结论

本文建立了永磁式缓速器转子鼓温度场计算模型,利用有限元方法分析了转子鼓的温度场的变化规律,最后进行了台架试验。结果表明台架试验与有限元计算数值的比较发现两者结果吻合较好。同时对误差进行了分析,发现误差产生的原因有:一是实际缓速器制动时随着温度的增加制动力矩会有所下降,内热源强度将发生变化,而本文假设内热源为常量;二是转子鼓材料的导热系数、比热容、换热系数从严格意义上讲应该为温度函数,本文假设上述参数为常量;此外在台架试验中温度传感器测试值本身就有一定的误差。

本文对温度场进行了分析目的是为缓速器转子鼓设计提供理论指导,通过有限元分析可知:为了减小转子鼓的温度和温度梯度,从而降低转子鼓内部热应力和转子鼓热变形,在设计转子鼓时须综合考虑导热系数、比热容和密度这三个参数。此外从结构上来讲:增加转子鼓轴向厚度、半径等都可以有效降低缓速器制动时温度上升梯度,从而减少制动力矩下降幅度,提高缓速器制动性能稳定性;但与此同时缓速器的重量也会相应增加。

[参 考 文 献]

- [1] 朱 宁,王永华. 轻型永久磁铁式汽车缓速器[J]. 客车技术与研究, 2002, 24(4): 19- 20.
- [2] 何建清. 车用电涡流缓速器的设计方法及其性能分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2003.
- [3] Scott Kimbrough. Optimal control of Electromagnetic Brake Retarders[J]. SAE 942325.
- [4] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998, 9: 169- 171.
- [5] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001, 5: 483- 488.
- [6] 赵镇南. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002, 7: 200- 210.
- [7] 唐兴伦. ANSYS 工程运用教程- 热于电磁学篇[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003, 1: 47- 54.
- [8] 魏丕勇. 钠冷组合式活塞温度场和热应力场的有限元分析计算[J]. 拖拉机与农用运输车, 1995, (6): 28- 33.
- [9] 叶晓明, 等. 柴油机活塞温度场试验研究及三位有限元分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(3): 46

- 48.

法[J]. 汽车工程, 2004, (2): 195- 200.

[10] 何仁, 衣丰艳, 何建清. 电涡流缓速器制动力矩的计算方

Analysis of non-stationary thermal field of rotor of permanent magnet retarder

Zhao Wanzhong, He Ren, Liu Chengye

(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The physical model based on heat transfer theory for analyzing the non-stationary thermal field of rotor of retarder in automobile was established. Considering heat convection and radiation the boundary conditions were defined in this paper. The finite element governing equation was derived using Galerkin method. The time differential item has been discreted based on Galerkin format that is stable on any condition. And a new style of time varying step method was used in iteration process. The temperature distribution of rotor was analyzed, and the temperature distribution in axial and radial direction was researched. At last, the temperature distribution in axial direction is measured, and it was founded that the testing and analytical data were uniform approximately. The rotor plate is optimized and the temperature rise and the temperature gradient of the rotor drum can be decreased by this article. So the braking performance stability can be improved by this research.

Key words: permanent magnet retarder; rotor; thermal field; numerical analysis; finite element