

牵引变流器限压电阻选型及保护策略研究

高吉磊^{1,2}, 郑雪洋¹, 李岩磊^{1,2}, 谢冰若^{1,2}, 宫帅^{1,2}, 王霖^{1,2}

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 机车车辆研究所, 北京 100081;
2. 北京纵横机电科技有限公司, 北京 100081)

摘要: 详细介绍了牵引变流器中间直流环节限压斩波回路的过压抑制基本原理, 给出了限压电阻选取准则。针对限压电阻的过温保护, 通过对牛顿冷却定律推导, 得到了限压电阻温度实时估算公式, 并形成了一种过温保护策略。通过试验得到限压电阻温度估算结果, 证明了所采用的过压抑制方法的有效性。

关键词: 动车组; 限压电阻; 牵引变流器; 温度估算; 保护策略

中图分类号: U266.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2021)02-0087-05

Research on Selection and Protection Strategy of Voltage-Limiting Resistor in Traction Converters

GAO Jilei^{1,2}, ZHENG Xueyang¹, LI Yanlei^{1,2}, XIE Bingruo^{1,2}, GONG Shuai^{1,2}, WANG Lin^{1,2}

(1. Locomotive & Car Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
2. Beijing Zongheng Electro-Mechanical Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: The basic principle of over voltage suppression for voltage-limiting chopper circuit of traction converters was introduced in details, and the selection criteria of voltage-limiting resistor was provided. Newton's law of cooling was derived to obtain the real-time estimation formula of the voltage-limiting resistor temperature, and the over voltage protection strategy of the resistor was proposed. The results of temperature estimation of the voltage-limiting resistor were given through experiments, and the effectiveness of the over voltage suppression method used was proved.

Keywords: EMU; voltage-limiting resistors; traction converters; temperature estimation; protection strategy

0 引言

动车组牵引变流器在运行过程中, 会由于弓网受流条件变化和负载突变等因素导致中间直流电压超出过压保护限制值, 从而出现变流器封锁的故障。为避免牵引变流器工作在过压工况, 在中间直流环节设置了限压斩波回路。该回路由 IGBT 模块和限压电阻串联组成, 当中间直流电压超过设定值时, IGBT 模块导通, 将直流电压限制在正常工作范围内, 从而实现牵引变流系统的正常运行。

IGBT 模块导通过于频繁或导通时间过长, 将导致限压电阻温度升高。为防止限压电阻过温烧损, 必须实时检测限压电阻的温度, 并对其进行过温保护^[1-3]。文献 [4] 和文献 [5] 针对轨道交通车辆牵引系统的制动电阻, 提出了不同的过温保护方法。文献 [4] 所提方法是在制动斩波回路设置电流传感器, 当 IGBT 模块导通时, 通过制动电阻两端的电压和流过制动电阻的电流计算出电阻的阻值。由于制动电阻采用金属材料制成, 其阻值随温度变化, 因而可根据制动电阻的阻值计算其温度值。文献 [5] 所提方法是采用惠斯通电桥法, 当

收稿日期: 2019-06-26; 修回日期: 2020-05-25

通信作者: 高吉磊 (1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事高速动车组牵引传动控制系统的研发工作;

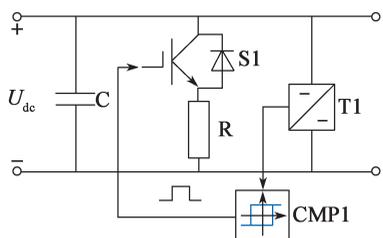
E-mail: gaojilei@zemt.cn

制动电阻的温度变化时,其阻值随之发生变化,从而导致电桥输出电压发生变化,据此采取应对措施以达到过温保护的目的。为了快速验证制动电阻设计是否满足技术要求,文献[6]采用数值算法对制动电阻元件表面传热系数进行分析与求解,得到恒定输入功率条件下电阻元件的表面传热系数,并以该稳态条件下表面传热系数为基础,采用集中参数法建立电阻元件的瞬态温升计算模型。

本文首先将详细介绍牵引变流器限压电阻的动作保护原理,从限压电阻消耗的功率、IGBT模块开关频率及最大工作电流等方面,讨论限压电阻阻值的选取原则;其次,根据限压电阻消耗的功率和限压电阻的热阻计算得到限压电阻的稳态温升,并通过牛顿冷却定律实时估算限压电阻的温度,形成一种限压电阻的温度保护策略;最后,给出限压电阻温度的估算结果,并通过试验验证过压抑制方法的有效性。

1 限压保护原理

牵引变流器限压斩波回路电路控制示意图如图1所示。图1中 U_{dc} 为中间直流电压,IGBT模块和限压电阻组成限压斩波回路,用于抑制中间直流电压过高;对IGBT模块采用电压滞环控制,比较的限制值为 U_{LU1} 和 U_{LU2} ,其中限制值 U_{LU2} 高于限制值 U_{LU1} 。



C—中间支撑电容; S1—IGBT模块; R—限压电阻; T1—直流电压传感器; CMP1—滞环比较环节。

图1 限压斩波回路控制示意图

Fig. 1 Diagram of voltage-limiting chopper circuit operating principle

当检测到中间直流电压超过限制值 U_{LU2} 时,IGBT模块导通,限压电阻将中间直流环节的多余能量消耗掉,直流电压被拉低;当直流电压下降到 U_{LU1} 时,认为其已下降到合理的工作范围,IGBT模块关闭;IGBT模块关闭后如果中间直流电压再次上升,并超过限制值 U_{LU2} ,则IGBT模块再次导通。通过对IGBT模块的滞环电压控制,将直流电压限制在 U_{LU2} 以下,以保证牵引变流器的正常运行。

2 限压电阻阻值的选取

限压电阻的主要参数为阻值和瞬时功率及允许持续工作的时间。限压电阻的瞬时功率可根据牵引变流

器的最高运行电压和电阻阻值计算得到;允许的持续工作时间则与限压电阻允许消耗的最大能量相关。允许持续工作的时间越长,则牵引变流器的可用性越高。

限压斩波回路的性能主要与限压电阻的阻值相关。以下主要分析限压电阻的阻值在选取时需要考虑的限制条件。

2.1 电气制动功率的限制

考虑最恶劣的工况,在弓网离线的情况下,四象限变流器失去向接触网回馈电能的能力,当动车组处于电气制动工况时,制动能量向中间直流电容C充电,使直流电压升高。当中间直流电压 U_{dc} 超过限制值 U_{LU2} 时,限压斩波IGBT模块导通,限压电阻工作,消耗制动能量。当牵引逆变器电气制动产生的能量大于限压电阻消耗的能量时,剩余的能量仍然向中间直流电容C充电,中间直流电压仍然会升高,无法达到限压保护的目的;在电气制动工况下,当牵引逆变器产生的能量小于限压电阻消耗的能量时,则中间直流电容向限压电阻放电,中间直流电压下降。

假设牵引变流器电气制动产生的最大制动功率为 $P_{b\max}$,则限压电阻消耗的功率必须高于 $P_{b\max}$,因此限压电阻阻值R应满足

$$R < \frac{U_{LU1}^2}{P_{b\max}} \quad (1)$$

当限压电阻的阻值满足式(1)时,才能保证牵引变流器在最大电气制动功率的工况下,限压斩波回路起到限制中间电压的作用。

2.2 IGBT开关频率的限制

假设当IGBT模块导通时,电气制动功率为 P_b ,导通时间为 t_{on} ,则这期间的电气制动能量可表示为

$$P_b t_{on} = \int_0^{t_{on}} \frac{U_{dc}(t)^2}{R} dt - \frac{1}{2} C (U_{LU2}^2 - U_{LU1}^2) \quad (2)$$

在IGBT模块导通期间,限压电阻消耗的功率 P_r 近似为

$$P_r = \frac{U_{dc}(t)^2}{R} = \frac{U_{avg}^2}{R} \quad (3)$$

式中: U_{avg} 为限压电阻上的平均电压, $U_{avg} = 0.5(U_{LU1} + U_{LU2})$ 。

将式(3)代入式(2)中,可得IGBT模块的导通时间 t_{on} 为

$$t_{on} = \frac{C(U_{LU2}^2 - U_{LU1}^2)}{2 \left(\frac{U_{avg}^2}{R} - P_b \right)} \quad (4)$$

当IGBT模块关闭后,中间直流电压从 U_{LU1} 升高到 U_{LU2} 时,需要的能量W为

$$W = \frac{1}{2} C (U_{LU2}^2 - U_{LU1}^2) \quad (5)$$

IGBT模块的关断时间 t_{off} 为

$$t_{\text{off}} = \frac{W}{P_b} = \frac{C(U_{\text{LU2}}^2 - U_{\text{LU1}}^2)}{2P_b} \quad (6)$$

根据式(4)和式(6)可知, 在限压斩波回路持续工作时, IGBT 模块的开关周期 T_s 为

$$T_s = t_{\text{on}} + t_{\text{off}} = \frac{CU_{\text{avg}}^2 (U_{\text{LU2}}^2 - U_{\text{LU1}}^2)}{2(U_{\text{avg}}^2 P_b - RP_b^2)} \quad (7)$$

对式(7)进行变换, 可得 IGBT 模块的开关频率 f_s 为

$$f_s = \frac{1}{T_s} = \frac{2(U_{\text{avg}}^2 P_b - RP_b^2)}{CU_{\text{avg}}^2 (U_{\text{LU2}}^2 - U_{\text{LU1}}^2)} = \frac{2[(U_{\text{LU2}} + U_{\text{LU1}})^2 P_b - 4RP_b^2]}{C(U_{\text{LU2}} + U_{\text{LU1}})^3 (U_{\text{LU2}} - U_{\text{LU1}})} \quad (8)$$

从式(8)可以看出, 限压斩波回路持续工作时的开关频率 f_s 与电压滞环宽度 $U_{\text{LU2}} - U_{\text{LU1}}$ 、电气制动功率 P_b 和限压电阻的阻值 R 相关。

假设滞环电压限制值已确定, 当电气制动功率为 P_b 时, 限压电阻的阻值 R 越大, IGBT 模块的开关频率 f_s 越低。如果 IGBT 模块的最大开关频率为 $f_{s \max}$, 则限压电阻的阻值 R 必须满足式(9)的要求。

$$R > -\frac{f_{s \max} C (U_{\text{LU2}} + U_{\text{LU1}})^3 (U_{\text{LU2}} - U_{\text{LU1}})}{8P_b^2} + \frac{(U_{\text{LU2}} + U_{\text{LU1}})^2}{4P_b} \quad (9)$$

式(9)右侧存在最大值, 当满足式(10)时其最大值出现。

$$P_b = f_{s \max} C (U_{\text{LU2}}^2 - U_{\text{LU1}}^2) \quad (10)$$

此时, 限压电阻阻值 R 必须满足下式:

$$R > \frac{U_{\text{LU2}} + U_{\text{LU1}}}{8f_{s \max} C (U_{\text{LU2}} - U_{\text{LU1}})} \quad (11)$$

当限压电阻的阻值 R 满足式(11)时, 能够保证在任意电气制动功率下, IGBT 模块的开关频率不超过其最大开关频率 $f_{s \max}$ 。

2.3 IGBT 工作电流限制

如果中间直流电压的最大工作电压为 $U_{\text{dc max}}$, 根据 IGBT 模块允许的最大可重复峰值电流 $I_{p \max}$, 限压电阻的阻值应满足

$$R > \frac{U_{\text{dc max}}}{I_{p \max}} \quad (12)$$

综合式(1)、式(11)和式(12), 可得限压电阻阻值的取值范围为

$$\max \left\{ \frac{(U_{\text{LU2}} + U_{\text{LU1}})}{8f_{s \max} C (U_{\text{LU2}} - U_{\text{LU1}})}, \frac{U_{\text{dc max}}}{I_{p \max}} \right\} < R < \frac{U_{\text{LU1}}^2}{P_{b \max}} \quad (13)$$

3 限压电阻过温保护

限压斩波回路频繁导通或长时间导通, 大量的能量通过限压电阻消耗, 将导致其温度升高。限压电阻温度过高, 将导致其烧毁, 因此必须对限压电阻进行过温保护。

3.1 限压电阻温度估算

对限压电阻进行过温保护的前提是牵引控制单元能够通过实时计算得到限压电阻的温度。当限压斩波回路导通时, 牵引控制单元根据中间直流电压的检测值 U_{dc} 和限压电阻的阻值 R , 计算得到限压电阻上的功率 P_r 为

$$P_r = \frac{U_{\text{dc}}^2}{R} \quad (14)$$

假设空气温度为 T_c , 限压电阻到空气的热阻为 R_{th} , 则可得到限压电阻与空气温度 T_c 之间的稳态温差 ΔT 为

$$\Delta T = P_r R_{\text{th}} \quad (15)$$

限压电阻的温度估算问题可归结为物体对流换热问题。在对流换热过程中, 固体壁面与流体之间的热阻可表示为^[7]

$$R_{\text{th}} = \frac{1}{hA} \quad (16)$$

式中: h 为对流传热系数; A 为换热面积。

当限压斩波回路封锁时, 限压电阻上消耗的功率为 0 kW, 因此限压电阻与环境温度的稳态温差 ΔT 为 0 K。牛顿冷却定律如下式所示:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} = -hA(T - T_c) \quad (17)$$

式中: T 为限压电阻在 t 时刻的温度; Q 为传递的热量; Φ 为传热功率, 即单位时间内的传递热量。

根据物质热容定义^[7], 可得热容 c 为

$$c = \frac{dQ}{dT} \quad (18)$$

根据式(17)和式(18)可得牛顿冷却定律的微分形式, 物体的温度在任何给定时刻变化的速率正比于它的温度与周围介质温度之差。如果限压电阻在 t 时刻的温度为 T , 空气温度为 T_c , 则限压电阻温度 T 的变化率表示为式(19)^[8]。

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{hA}{c}(T - T_c) = -k(T - T_c) \quad (19)$$

式中: k 为比例系数, 与电阻的传热系数 h 、换热面积 A 和热容 c 有关。

牛顿冷却定律适用于物体冷却的情况, 也适用于物体加热的情况。当限压斩波模块不导通时, ΔT 为 0 K, 限压电阻冷却的目标温度为空气温度 T_c ; 当限压

斩波模块导通时，限压电阻温度升高，限压电阻的目标温度为 $\Delta T + T_c$ 。考虑冷却和加热 2 种工况，限压电阻的温度变化率可写为

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_c - \Delta T) \quad (20)$$

假设 $y = T - T_c$ ，表示限压电阻当前温度与空气温度之间的温度差，则上式改写为

$$\frac{dy}{dt} = -ky + k\Delta T \quad (21)$$

将式 (21) 通过拉普拉斯变换转变为

$$sy = -ky + k\Delta T \quad (22)$$

限压电阻温度与空气温度之间的当前温差，与稳态温差的关系为

$$y = \frac{k}{s+k} \Delta T \quad (23)$$

根据式 (23) 可得限压电阻当前温度 T 为

$$T = \frac{k}{s+k} \Delta T + T_c \quad (24)$$

将式 (24) 进一步离散化，即可得到用于微控制器计算的差分方程。

3.2 过温保护策略

限压电阻过温保护策略如图 2 所示，牵引控制单元中设置限压电阻温度保护限制值 T_{Ov1} 和 T_{Ov2} ，当限压电阻的温度超过其过温限制值 T_{Ov1} 时，封锁牵引变流器，防止其运行使限压斩波模块持续动作而导致限压电阻温度持续升高的问题发生。牵引变流器封锁后，限压斩波回路关闭，限压电阻的温度降低，当其降低到开通温度限制值 T_{Ov0} 以下时，表明限压电阻再次被允许投入运行，此时牵引控制单元解除对牵引变流器的封锁。如果在短时间内，限压电阻的温度频繁超过

保护温度限制值 T_{Ov1} ，则认为牵引变流器存在故障，需永久切除该牵引变流器。

在限压电阻温度超过限制值 T_{Ov1} 时，牵引变流器封锁脉冲，如果此时直流电压仍然较高，并且导致限压电阻的温度超过限制值 T_{Ov2} ，则牵引控制单元将不允许限压电阻被再次投入运行，需永久切除该牵引变流器。

4 试验结果

4.1 温度估算结果

为了验证本文所采用的限压电阻温度估算方法，试验选用了常温下阻值为 3.3Ω 的限压电阻。在室温 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 下对限压电阻施加电压，测试限压电阻的稳态温升，计算得到其热阻的具体数值如表 1 所示。

表 1 限压电阻热阻测试数值

Table 1 Thermal resistance test value of voltage-limiting resistor

功率 P_f/kW	稳态温度 $T/^\circ\text{C}$	热阻 $R_{th}/(\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{kW}^{-1})$
0.5	198	346.0
1.0	318	293.0
1.5	427	268.0
2.0	500	237.5

通过数值拟合的方式，可以得到限压电阻温度与热阻的关系为

$$R_{th} = -0.3617T + 418 \quad (25)$$

将限压电阻加热到 $427 \text{ }^\circ\text{C}$ 后，测量限压电阻在不同温度时的阻值，得到限压电阻阻值随温度变化数据如表 2 所示。

表 2 限压电阻阻值温度数据

Table 2 Voltage-limiting resistance value relative to temperature

温度 $T/^\circ\text{C}$	阻值 R/Ω	温度 $T/^\circ\text{C}$	阻值 R/Ω
35.0	3.370	230.0	3.571
70.7	3.394	320.0	3.710
163.0	3.495	410.0	4.100

分析表 2 数据得到限压电阻阻值与温度的关系为

$$R = 0.001268T + 3.3 \quad (26)$$

限压电阻初始温度为室温 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ，给限压电阻持续施加约 1.5 kW 的功率，使其温度到达最高值，然后取消限压电阻两端电压，使其自然冷却。图 3 为软件估算的限压电阻的温度变化曲线，数据采样的周期约为 100 ms 。从图 3 可以看出，当限压电阻被施加 1.5 kW 的功率后，温度迅速上升，随后温度上升速率逐渐变慢，达到最高温度 $418 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在自然冷却过程中，限压电阻的温度下降速率逐渐变慢，最后恢复为室温，符合物体温度的变化规律。

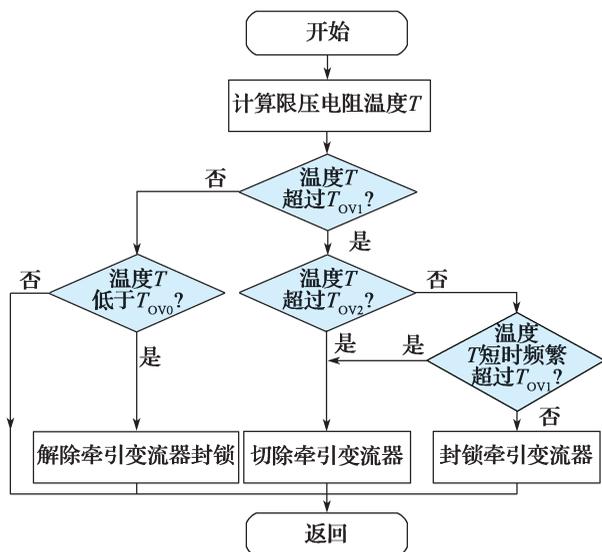


图 2 限压电阻过温保护流程图

Fig. 2 Flow chart of over temperature protection method for voltage-limiting resistor

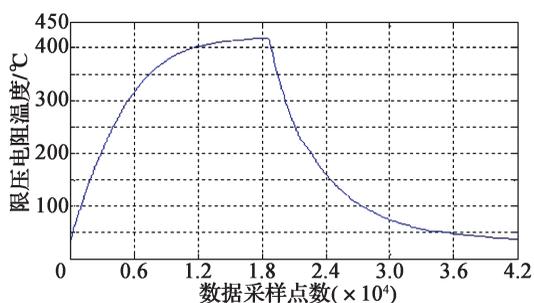


图3 软件估算限压电阻温度变化曲线

Fig. 3 Temperature variation curve of voltage-limiting resistor estimated by software

4.2 过压抑制试验结果

将四象限变流器脉冲封锁, 牵引逆变器处于电气制动工况下的状态, 给中间直流环节充电, 测试限压电阻的过压抑制效果。图4为DSP控制器采集的中间直流电压的试验波形图, 采样周期为0.75 ms。从图4可以看出, 由于牵引逆变器处于电气制动制动工况下的状态, 导致中间直流电压升高, 但是由于限压斩波模块的作用, 直流电压实际值始终低于上限限制值4 000 V。试验结果表明, 限压斩波模块能够消耗电气制动产生的电能, 抑制中间直流电压持续升高。图4中由于牵引变流器中间直流回路存在LC谐振回路, 当限压斩波模块导通时, 直流电压存在交流谐振分量。

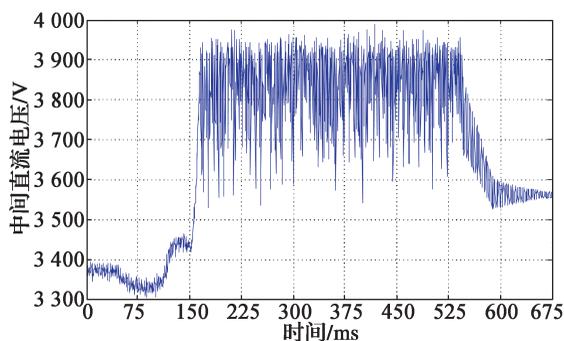


图4 中间直流电压试验波形

Fig. 4 Test waveform of intermediate DC voltage

5 结论

本文介绍了牵引系统限压斩波回路抑制中间直流电压过压的基本原理, 分析了电气制动功率、IGBT模块开关频率及工作电流与限压电阻阻值之间的关系, 给出了限压电阻阻值选取的边界范围; 同时, 为了防止限压电阻因过热烧损, 提出了采用牛顿冷却定律对限压电阻温度进行估算, 推导了适于微控制器实现的估算公式, 并给出了限压电阻过温保护策略。最后, 通过试验验证了本文所采用方法的有效性。

采用本文所提出的选型方法设计的限压电阻已得

到实际批量应用, 实现了对牵引变流器中间直流环节过电压的抑制。限压电阻温度估算方法的具体实现受微控制器温度表示范围和精度、电气制动功率大小、限压电阻阻值等因素的制约, 在具体实现时需进行适当的变换和处理。通过限压电阻过温保护策略, 避免了限压电阻因长时间工作导致温度过高而烧损的问题, 为牵引变流器持续稳定运行提供了有力的保障。

参考文献:

- [1] 刘昉, 陶勇. DF₈B型机车制动电阻带烧损原因分析及改进[J]. 机车电传动, 2012(4): 84.
LIU Fang, TAO Yong. Cause analysis and improvement of brake resistance band burning of DF₈B locomotive[J]. Electric Drive for Locomotives, 2012(4): 84.
- [2] 韩治国. SS₄型电力机车制动电阻烧损的原因分析与改进[J]. 铁道机车与动车, 2014(2): 47-48.
HAN Zhiguo. Cause analysis and improvement of brake resistance burning of SS₄ electric locomotive[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2014(2): 47-48.
- [3] 刘海. 西安地铁2号线车载制动电阻过温故障研究[J]. 现代城市轨道交通, 2018(10): 31-34.
LIU Hai. Research on over-temperature protection of vehicle brake resistance for Xi'an metro line 2[J]. Modern Urban Transit, 2018(10): 31-34.
- [4] 涂熙, 毛康鑫, 徐绍龙. 国产城轨车辆制动电阻过温保护新方案[J]. 机车电传动, 2017(4): 80-84.
TU Xi, MAO Kangxin, XU Shaolong. Over-temperature protection of braking resistor for domestic metro vehicle[J]. Electric Drive for Locomotives, 2017(4): 80-84.
- [5] 周晓非. 一种新颖的制动电阻过热保护装置[J]. 电力电子, 2005(5): 39-41.
ZHOU Xiaofei. Thermal protection device to protect brake resistor against over temperatures[J]. Power Electronics, 2005(5): 39-41.
- [6] 唐邕浦, 彭自坚. 基于数值计算的制动电阻元件表面传热系数研究[J]. 机车电传动, 2017(3): 62-66.
TANG Yongpu, PENG Zijian. Research on the surface heat transfer coefficient of brake resistor element based on numerical method[J]. Electric Drive for Locomotives, 2017(3): 62-66.
- [7] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 14-15.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat Transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 14-15.
- [8] 刘志华, 刘瑞金. 牛顿冷却定律的冷却规律研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2005, 19(6): 23-27.
LIU Zhihua, LIU Ruijin. Study on cooling regularity for Newton's law of cooling[J]. Journal Of Shandong University Of Technology(Nature Science Edition), 2005, 19(6): 23-27.