

匝间无绝缘的超导磁体线圈研究及性能测试

白质明¹, 陈 传², 俎维振¹, 张华荣³

(1. 东北大学 理学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819;

3. 宝胜科技创新股份有限公司, 江苏 扬州 225800)

摘 要: 分析了匝间无绝缘的超导磁体线圈的结构, 主要测试了线圈总层数和每层匝数对其等效总电阻的影响以及线圈的励磁退磁性能. 实验结果表明: 当总层数为奇数和偶数时, 等效总电阻的变化趋势完全不同, 但量级均为相邻匝间接触电阻的几倍. 等效总电阻大小直接影响着线圈的励磁、退磁过程. 线圈总电阻越大, 则励磁时间越短, 但同时感应电压也越大, 焦耳热也会增加. 所以, 对于无绝缘超导磁体线圈的设计, 选择合适的线圈等效总电阻及匝间的无绝缘填充材料尤为重要.

关 键 词: 无绝缘; 超导磁体线圈; 相邻匝间接触电阻; 等效总电阻; 励磁退磁

中图分类号: TM 26 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)06-0908-05

Study on Non-insulated Superconducting Magnet Coils and Performance Testing

BAI Zhi-ming¹, CHEN Chuan², ZU Wei-zhen¹, ZHANG Hua-rong³

(1. School of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Materials Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Baosheng Science and Technology Innovation Ltd., Yangzhou 225800, China. Corresponding author: BAI Zhi-ming, professor, E-mail: baizm@126.com)

Abstract: The structure of superconducting magnet coils without turn-to-turn insulation was analyzed, and the effects of total number of layers and the turns for each layer on the equivalent total resistance and charge-discharge process of the coils were tested. The experimental results show that the variation trend of the equivalent total resistance is completely different when the total layer number is odd or even, but the order of magnitude is several multiples of the contact resistance between adjacent turns. The charge-discharge process of coils is directly affected by the equivalent total resistance. If the total resistance is greater, the excitation time will be shorter, but the induced voltage will be also larger, and the Joule heat will be increased. Therefore, the appropriate choice of equivalent total resistance and no insulation filling material are particularly important for the design of non-insulated superconducting magnet coils.

Key words: non-insulation; superconducting magnet coil; adjacent turn-to-turn contact resistance; equivalent total resistance; charge-discharge

目前超导磁体大多都是绝缘超导磁体, 磁体线圈的匝间或层间填充绝缘材料, 如环氧树脂或Kapton带等, 阻止电流在相邻超导导线里流动. 但绝缘超导磁体伴有的失超现象会给磁体带来潜在的危害, 如磁体失超后, 局部温度过高会造成超导磁体损坏, 层间的电压过高会击穿绝缘材料等. 所以, 人们采取各种方法来解决绝缘超导磁体的失

超问题^[1-4]. 近年学者提出无绝缘超导磁体的概念并进行相关研究^[5-8]. 无绝缘超导磁体线圈, 即超导导线带材表面不喷涂绝缘物质, 而是在超导磁体线圈的制备过程中, 在相邻超导导线之间填充带有一定导电性的非绝缘材料. 无绝缘超导磁体一旦失超可以使电流从相邻匝间或相邻层间流过, 从而使超导磁体继续工作. 无绝缘材料须具有良

好的导热性,使失超点的热量快速散发出去,不至于使失超点向邻近四周扩散从而使整个超导磁体全部失超.无绝缘技术的关键是可以使失超点的电流通过非绝缘材料分散到相邻超导导线内,降低失超点发热速率,所以无绝缘超导磁体在失超保护和热稳定性等方面具有很大优势^[9-10].

目前国外有几个科研团队对无绝缘超导磁体线圈进行了一些研究^[5-8],而我国在这方面的研究及应用尚处于起步阶段.与绝缘超导磁体相比,无绝缘超导磁体的绕制技术使超导磁体结构更加紧凑,工作更加稳定.本实验采用 NbTi 低温超导导线制备无绝缘超导磁体线圈,对其等效总电阻随总层数和每层匝数的变化趋势进行实验研究,并测试其励磁和退磁性能,从中摸索出一些无绝缘超导线圈的特点和规律,为无绝缘超导磁体的优化设计提供参考依据.

1 无绝缘超导磁体线圈的结构分析

图 1 为绝缘超导磁体线圈与无绝缘超导磁体线圈的结构示意图.绝缘超导磁体线圈在超导导线外层都包裹着绝缘层,电流不会在相邻超导导线里流动.为了防止过热,绝缘超导线圈必须用很好的导热金属,通常是铜.而无绝缘超导磁体线圈在相邻超导导线之间填充带有一定电阻的非绝缘材料,使相邻超导导线(匝间或层间)有一定的导电性.无绝缘超导磁体一旦失超,可以使电流从相邻匝间或相邻层间流过,进而减小失超点的电流密度,这样既可以抑制从局部失超变成全部失超,也能避免层间电压过高从而击穿整个超导磁体.

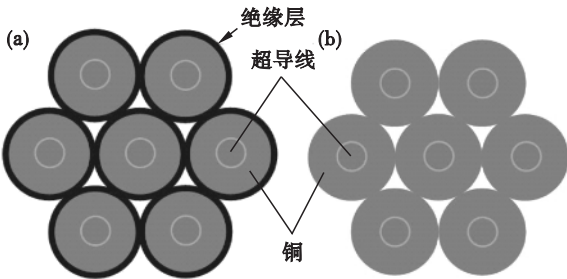


图 1 超导磁体线圈的结构示意图

Fig. 1 Schematics of superconducting magnet coils

(a)—绝缘;(b)—无绝缘.

无绝缘超导磁体线圈的等效电路模型如图 2 所示.它包括一个直流电源,一个分流电阻(R_{shunt}),一个开关和一个在低温环境下的测试线圈.无绝缘超导磁体线圈在励磁、退磁时,电流可

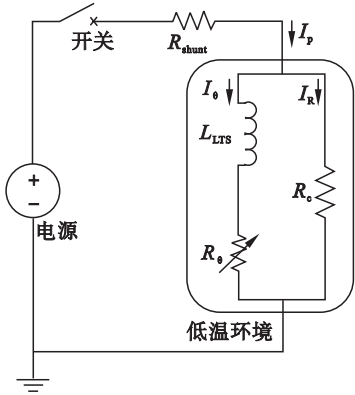


图 2 无绝缘超导磁体线圈的等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of the non-insulated superconducting magnet coils

以分别通过匝与匝和层与层沿径向和轴向流动;而正常工作时,电流只沿着超导导线螺旋路径流动.无绝缘超导磁体线圈主要由三部分组成: L_{LTS} 为低温超导磁体线圈自感; R_c 是磁体径向和轴向的等效总电阻; R_o 为导线基质金属电阻,当工作电流低于临界电流时, R_o 的值非常小,不会对等效总电阻产生影响,可以忽略不计.在绝缘超导磁体线圈中,因为超导导线有绝缘层,认为 R_c 无穷大.而对于无绝缘超导磁体线圈,电阻 R_c 是一个复杂的网络,其理论计算很复杂^[11-12].本文制作几个小型的 NbTi 无绝缘超导磁体线圈,通过测量来探究 R_c 阻值随层数和匝数的变化规律,并对无绝缘超导磁体线圈的励磁和退磁性能进行测试,得到一些初步的实验数据,为进一步研究无绝缘超导线圈设计和应用奠定一定基础.

2 NbTi 无绝缘超导磁体线圈的制备

本实验采用直径 0.20 mm 的 NbTi 超导线材制备无绝缘超导磁体线圈.首先清洗 NbTi 线的绝缘皮,然后将 NbTi 线均匀缠绕在线轴上,最后在 NbTi 线之间填充非绝缘材料.实验采用双线紧绕法,即将 NbTi 线与铜线并排缠绕在线轴上,当取下铜线时,可以保证 NbTi 线的匝间间距相等,然后填充非绝缘物质,即完成了无绝缘超导线圈的单层制作,如此循环直到所需层数即可.

选用石蜡和碳粉的混合物作为填充的非绝缘材料.为了达到实验所需要的电阻率,将石蜡熔化后与碳粉按照一定的比例混合,待搅拌均匀后填充到 NbTi 线之间.制作完成的 NbTi 无绝缘超导磁体线圈基本参数为直径 39.70 mm,长度 99.0 mm,层数 1,匝数 245,电感 5.9 μ H.

3 结果与讨论

3.1 温度对无绝缘超导线圈匝间电阻的影响

将 NbTi 无绝缘超导磁体线圈置于制冷机中,进行降温实验,研究匝间电阻随温度的变化关系.由于所制作的 NbTi 无绝缘超导磁体线圈的质量和体积都比较小,制冷机的二级冷头可以承受其重量,所以采用直接接触的方法将线圈固定在二级冷头上进行降温,同时测试匝间电阻的变化情况,结果如图 3 所示.可以看到随着温度的降低电阻变小,阻值的变化规律近似于抛物线.当温度降低至 17 K 时阻值发生突变.当温度降低至 10 K 时,阻值趋于稳定,约为常温下阻值的 40%.产生这种现象的原因,是由于随着温度的降低,石蜡和碳粉发生热胀冷缩的程度不同,粒子之间的应力改变导致电阻阻值发生改变;同时由于非绝缘材料受低温影响与超导线圈的接触发生改变,这也会造成电阻阻值的变化.

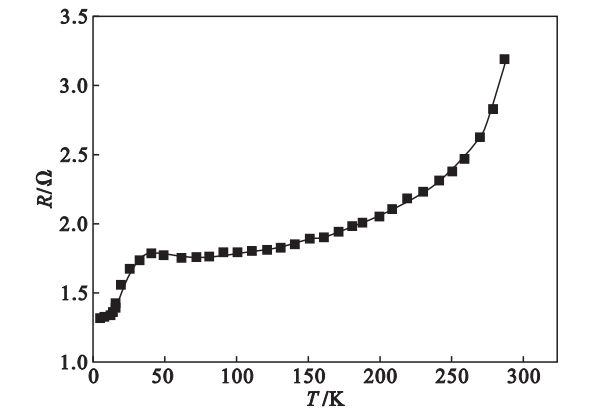


图 3 匝间电阻与温度的关系

Fig. 3 Curve of turn-to-turn resistance vs temperature

3.2 匝数和层数对无绝缘超导线圈总电阻的影响

通过对无绝缘磁体线圈匝间与层间的电阻网络结构分析^[9,12-13],可知总层数的奇偶会影响磁体线圈首端和尾端(即第一匝和最后一匝)的相对位置,进而影响等效总电阻 R_c 值.通过在常温下测试几个自制的小型磁体线圈,可得到无绝缘线圈总电阻 R_c 随总层数的变化规律.结果发现,总层数为奇数或偶数,等效总电阻的变化趋势完全不同.为了研究总电阻与匝间电阻的倍数关系,数据处理时把匝间电阻折算为 1 Ω .

当总层数为奇数时,等效总电阻随层数和每层匝数的变化趋势如图 4a 所示.由图可见,当每层匝数一定时,随着总层数的增加等效总电阻先

减小然后再增大,并且当总层数超过 10 层时,阻值的变化范围不大.另外也可看出,当总层数比较少时,随每层匝数的不同,等效总电阻的变化速率较快.通过数据分析发现,当总层数和每层匝数近似相等时,总阻值最小.这是因为此时磁体线圈的电阻网络近似为一个方形矩阵,除此以外均为矩形矩阵,二端网络等效总阻值都会变大.可见,对于奇数层无绝缘磁体线圈,每层匝数对其总电阻 R_c 的影响较大,尤其是在层数较少的情况下更加明显.

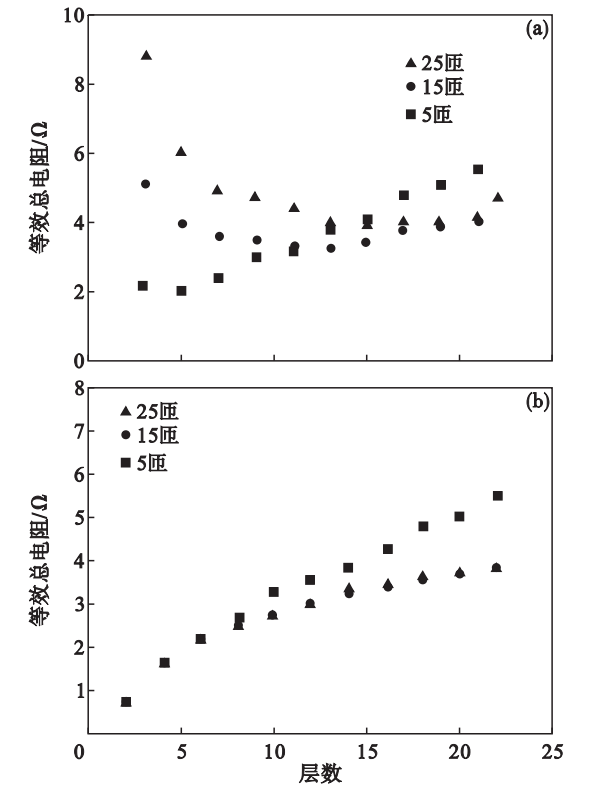


图 4 等效总电阻随层数的变化趋势

Fig. 4 Variation trends of resistances with total layer numbers

(a)—总层数为奇数;(b)—总层数为偶数.

当总层数为偶数时,等效总电阻随层数和每层匝数的变化趋势如图 4b 所示.由图可以看出,等效总电阻随层数的增加而增大,并且在总层数较小时,总电阻和每层的匝数无关.当总层数在 10 层以上时,阻值的增加较缓慢.总体来说,对于偶数层的无绝缘磁体线圈,总层数一定时,每层的匝数对其等效总电阻 R_c 的影响不大.

通过图 4 可得到,在总层数较少的情况下,每层匝数相同时,偶数层线圈的总电阻小于奇数层线圈的总电阻.总层数无论奇偶,总电阻量级均为相邻匝间接触电阻的几倍.综合测试结果说明,在无绝缘超导磁体线圈设计和制作中,应该考虑匝间电阻大小即非绝缘材料的选择以及匝数和层数

对等效总电阻 R_c 的影响,使无绝缘超导磁体线圈的结构设计更合理,工作性能更安全稳定。

3.3 励磁和退磁实验及分析

无绝缘超导磁体线圈的总电阻 R_c 会直接影响其励磁、退磁性能,本文对 NbTi 无绝缘超导磁体线圈的励磁和退磁性能进行了测试,实验结果如图 5 所示。励磁过程中,电流缓慢增加,线圈会产生感应电压;电流稳定后,线圈处于超导状态,不再产生感应电压。

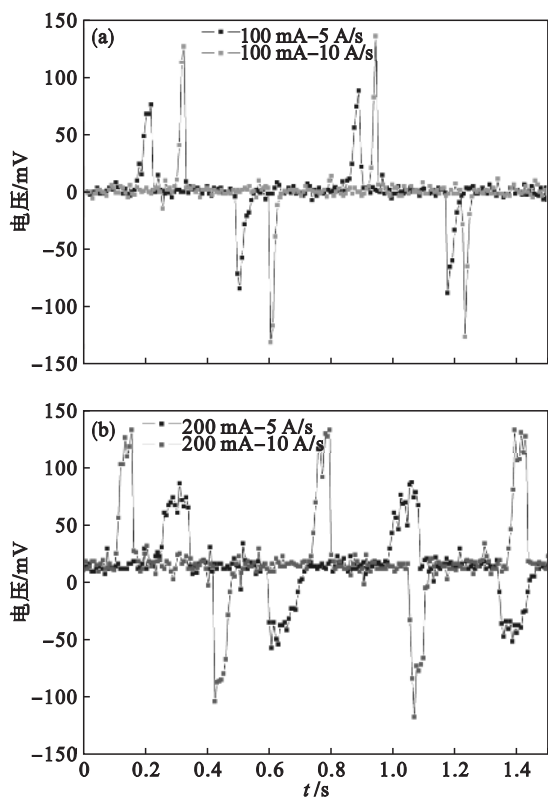


图 5 NbTi 无绝缘超导磁体线圈励磁退磁电压与时间的关系

Fig. 5 Curve of the charge-discharge voltage vs. time for NbTi non-insulated superconducting magnet coil

(a)—工作电流为 100 mA ;(b)—工作电流为 200 mA.

由图 5 可见,工作电流相同时,电流增大的速率越快,产生的感应电压就越大,线圈到达稳定状态的时间越短。例如,图 5a 中工作电流为 100 mA,当电流增大速率为 10 A/s 时,其感应电压最高为 128.2 mV,到达稳态的时间为 0.03 s;当电流增大速率为 5 A/s 时,其感应电压最高为 76.8 mV,到达稳定的时间为 0.05 s。在线圈励磁完成后,以相同的电流速率进行退磁测试,线圈产生的感应电压值和所需稳定的时间与励磁时的一样。因此线圈的退磁过程也和电流速率有着密切关系。电流的下降速率越快,线圈的退磁时间越短。图 5b 是工作电流为 200 mA 时,不同电流上

升速率的励磁退磁实验。由图可见,电流速率分别为 5 和 10 A/s 时,其感应电压最高值分别为 40.8 和 87.4 mV;到达稳定的时间分别为 0.1 和 0.066 s。因此,提高电流上升或下降速率可以有效提高无绝缘超导磁体线圈的励磁、退磁速度,缩短励磁、退磁时间。这对于提高超导磁体线圈的工作效率、延长其使用寿命均具有重大意义。

对于超导磁体线圈,虽然提高电流上升速率可以减小励磁时间,但过快的电流上升速率会产生过大的感应电压,产生大量焦耳热,使线圈局部温度过高,可能发生失超转变;因此,选择合适的励磁电流上升速率十分重要。

由于无绝缘超导磁体线圈的匝间无绝缘,导致励磁、退磁电压有延迟现象。延迟的快慢和线圈的等效总电阻 R_c 有关,通过增大 R_c 可以减小延迟时间,但同时励磁过程中 R_c 上的感应电压又会产生焦耳热,所以 R_c 也不能过大。因此,对于无绝缘超导磁体线圈的设计,找到最佳的等效总电阻 R_c 值尤为重要。而电阻 R_c 的大小又取决于层数、匝数以及匝间填充的无绝缘材料。有关匝间的无绝缘材料如何选择还有待进一步深入研究。

4 结 论

1) 通过测试得到了等效总电阻随层数和匝数的变化规律。总层数无论奇偶,等效总电阻 R_c 的量级均为相邻匝间电阻的几倍。当总层数为奇数时,随着层数的增加,等效总电阻先减小后变大,且层数与匝数接近时,等效总电阻最小;层数较少时,受每层匝数的影响较大。对于偶数层的无绝缘磁体线圈,等效总电阻随层数增加而增大。

2) 无绝缘超导磁体线圈励磁及退磁的实验表明,励磁时间取决于励磁电流速率和励磁电压延迟两部分。工作电流相同时,提高电流上升速率可以缩短励磁时间,同时感应电压也变大;感应电压的延迟时间随线圈等效总电阻的增大而减少。

3) 无绝缘超导磁体线圈总电阻的大小取决于线圈的层数、匝数以及匝间填充的无绝缘材料。

参考文献：

- [1] Salasoo L. Superconducting magnet quench protection analysis and design [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1991, 27(2): 1908-1911.
- [2] Dudarev A V, Keilin V E, Kuroedov Y D, et al. Quench protection of very large superconducting magnets [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 1995, 5(2): 226-229.

[3] Choi S ,Bae J H ,Sohn M H ,et al. A study on the design and quench protection of a conduction-cooled magnet for a superconducting property measurement system [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* ,2011 ,21 (3) : 2410 – 2414.

[4] Chu Y ,Kim H M ,Jang M H ,et al. Design and characteristic analysis of active quench protection system for superconducting magnet [J]. *Physica :C* ,2000 ,341/342/343/344/345/346/347/348 :2605 – 2606.

[5] Hahn S ,Park D K ,Bascunán J ,et al. HTS pancake coils without turn-to-turn insulation [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 2011 21(3) :1592 – 1595.

[6] Choi S ,Joo H C ,Hwang Y J ,et al. A study on the no insulation winding method of the HTS coil [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* ,2012 ,22(3) : 4904004.

[7] Hahn S ,Park D K ,Kim K ,et al. No-insulation (NI) winding technique for premature-quench-free NbTi MRI magnets [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 2012 , 22(3) :4501004.

[8] Yoon S ,Cheon K ,Lee H ,et al. The performance of the conduction cooled 2G HTS magnet wound without turn to turn insulation generating 4. 1 T in 102 mm bore [J]. *Physica :C* 2013 494 :242 – 245.

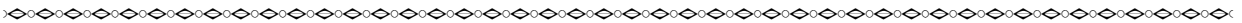
[9] Kim S B ,Kaneko T ,Saito A ,et al. The study on improving the self-protection ability of HTS coils by removing the insulation and lamination of the various metal tapes [J]. *Physica :C* 2013 484 :310 – 315.

[10] Choi Y H ,Kwon O J ,Kim Y G ,et al. Thermal quench behaviors of no-insulation coils wound using GdBCO coated conductor tapes with various lamination materials[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* ,2014 ,24(3) : 8800105.

[11] Noguchi S ,Itoh R ,Hahn S ,et al. Numerical simulation of superconducting coil wound with no-insulation NbTi wire [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 2014 , 24(3) :4900504.

[12] Kim Y ,Hahn S ,Ling J ,et al. Partial-insulation winding technique for NbTi coils[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 2014 24(3) :4700505.

[13] Bai Z M ,Zu W Z ,Chen C ,et al. Modeling and numerical analysis of resistance network for non-insulated superconducting magnet [J]. *Cryogenics* 2014 60 :19 – 23.



(上接第 907 页)

4 结 语

本文针对考虑顾客选择行为的服务要素优化配置问题 ,给出了一种决策分析方法. 在该方法中 ,考虑了目标顾客群体针对服务要素的选择行为 ,通过刻画顾客欣喜与失望的心理感知 ,将顾客感知效用引入离散选择模型中 ,给出了顾客感知效用最大化的顾客选择行为模型 ,并在此基础上构建并求解服务要素优化配置模型 ,最终确定服务要素优化配置方案. 运用本文方法确定的服务要素配置方案反映了目标顾客群体的选择行为 ,为解决现实中的服务要素优化配置问题提供了一种新思路 ,具有实际应用价值.

参考文献 :

[1] Cook L S ,Bowen D E ,Chase R B ,et al. Human issues in service design [J]. *Journal of Operations Management* , 2002 20(2) :159 – 174.

[2] Barbieri S ,Fragnière E ,Sitten M S ,et al. Proposal of a methodology to integrate the human factor in the service blueprint [J]. *Journal of Advanced Management Science* , 2013 1(2) :207 – 213.

[3] Dachyar M ,Omar M ,Sena P A. Analysis of satisfaction and improvement design of electronic insurance claim service [J]. *Advanced Science Letters* 2014 20(1) :309 – 311.

[4] 徐皓 ,樊治平 ,刘洋. 服务设计中确定服务要素组合方案的方法 [J]. *管理科学* 2011 24(1) :56 – 62.

(Xu Hao ,Fan Zhi-ping ,Liu Yang. Method for determining service attributes portfolio alternative in service design [J]. *Journal of Management Science* 2011 24(1) :56 – 62.)

[5] Victorino L ,Verma R ,Plaschka G ,et al. Service innovation and customer choices in the hospitality industry [J]. *Managing Service Quality* 2005 15(6) :555 – 576.

[6] Ding X ,Verma R ,Iqbal Z. Self-service technology and online financial service choice [J]. *International Journal of Service Industry Management* 2007 18(3) :246 – 268.

[7] Tversky A ,Kahneman D. Advances in prospect theory : cumulative representation of uncertainty[J]. *Journal of Risk and Uncertainty* ,1992 5(4) :297 – 323.

[8] Bell D E. Disappointment in decision making under uncertainty [J]. *Operations Research* ,1985 33(1) :1 – 27.

[9] Laciana C E ,Weber E U. Correcting expected utility for comparisons between alternative outcomes : a unified parameterization of regret and disappointment[J]. *Journal of Risk and Uncertainty* 2008 36(1) :1 – 17.

[10] Ben-Akiva M E ,Lerman S R. Discrete choice analysis theory and application to travel demand [M]. Boston :The MIT Press ,1985.