

缆拱桥的结构形式和性能

谢肖礼¹, 张一鸣¹, 王 波²

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 中铁大桥科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 提出了一种桥梁结构体系——缆拱桥, 其结构的主要特征是缆索两端锚固于拱脚或其附近, 荷载由拱肋与缆索共同承担。拱既是承重构件, 又起到锚碇作用; 缆既是承重构件, 又起到系杆作用。给出了缆拱桥的具体结构形式, 并对其结构强度、刚度、稳定特性及动力特性进行有限元分析。结果表明: 与相同跨度及截面的系杆拱桥相比, 缆拱桥的稳定承载力及强度承载力大幅提高, 刚度略有下降。此外, 缆拱桥造型美观, 更容易做到力与美的统一, 且其较高的稳定承载力和强度承载力为拱结构跨度提升提供了新的有效途径。

关键词: 缆拱桥; 拱肋; 锚碇; 系杆; 缆索

中图分类号: U448.25

文献标志码: A

Structure and Performance of Cable-arch Bridge

XIE Xiaoli¹, ZHANG Yiming¹, WANG Bo²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. China Railway Bridge Science Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: A bridge structure system, the cable-arch bridge, is presented in this paper. The main feature of the structure is that the cable is anchored on the arch foot or nearby and the load is borne by the arch and the cable. The arch is both load bearing and anchored, and the cable is both load bearing and tie bar. The structure of the bridge is given, and the structural strength, the stiffness, the stability and the dynamic characteristics of the bridge are analyzed by finite element method. The results show that the stability and the strength bearing capacity of the bridge are greatly improved and the rigidity is slightly decreased compared with the tied arch bridge with the same span and cross section. In addition, the cable-arch bridge is easier to achieve the unity of force and beauty, and its high stability provides a new effective way to improve the span of arch structure.

Key words: cable-arch bridge; arch; anchorage; tied bar; cable

悬索结构受力以受拉为主, 具有很强的跨越能力, 但其结构刚度较低, 缆索承重产生的水平力需要靠锚碇平衡; 拱结构受力以受压为主, 具有较强的刚度, 但其跨越能力受到稳定性的制约, 承重后产生的水平力需要靠系杆或基础平衡^[1]。不同桥型之间的协同工作, 一直是桥梁创新的重要内容^[2-4], 悬索结构与拱结构的协同工作取得了不少研究成果, 但也存在诸多问题需要解决^[5-7]。如在结构稳定性方面, 活载作用下的组合体系面内稳定性问题并不明显, 而其面外稳定性问题仍然突出。对桥梁极限跨度的研究也一直是桥梁研究的热点, 目前已建成拱桥跨径均未超过 600 m。制约拱式结构跨度增大的因素有多种, 除最为直接的材料性能和施工风险外, 稳定性同样也是一个制约跨径增大的关键因素, 拱肋作为压弯构件, 其结构承载力常由稳定承载力所决定^[8-9]。

为了保持拱结构和悬索结构的性能优势, 本文提出一种桥梁结构体系——缆拱桥(见图 1), 该结构的主要特征是缆索两端锚固于拱脚或其附近, 荷载由拱肋与缆索共同承担。该桥型拱结构自重及承担荷载产生的水平推力与缆索结构承担荷载产生的水平张力在拱脚处平衡, 在较大程度上消除了悬索结构和拱结构存在的弊端。本文将主要介绍缆拱桥的结构形式及力学原理, 并对缆拱桥及梁拱固结系杆拱桥的结构强度、刚度、稳定特性及动力特性进行对比分析。

1 结构形式及力学原理

1.1 结构形式

缆拱桥的结构形式图 2 所示, 主要由拱肋、缆索、吊索、垂度杆及主梁等组成。垂度杆结构与悬索桥索塔相似, 可采用混凝土结构或钢结构, 其顶部设

收稿日期: 2017-03-22

基金项目: 广西防灾减灾与工程安全重点实验室系统性研究项目(2016ZDX0001)

第一作者: 谢肖礼(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁结构体系。E-mail: guxiexiaoli@126.com

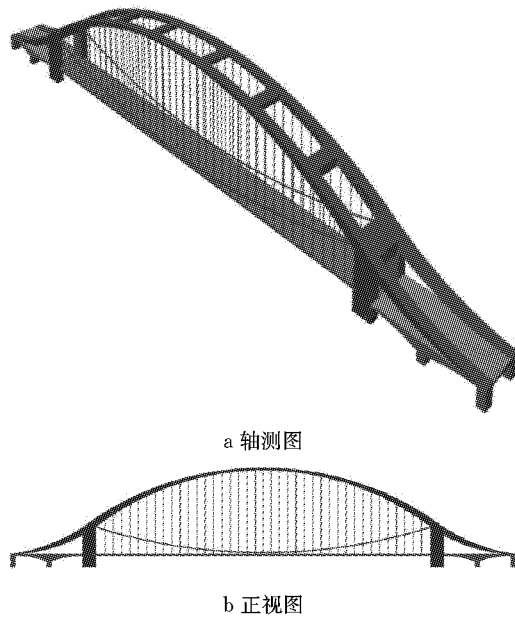
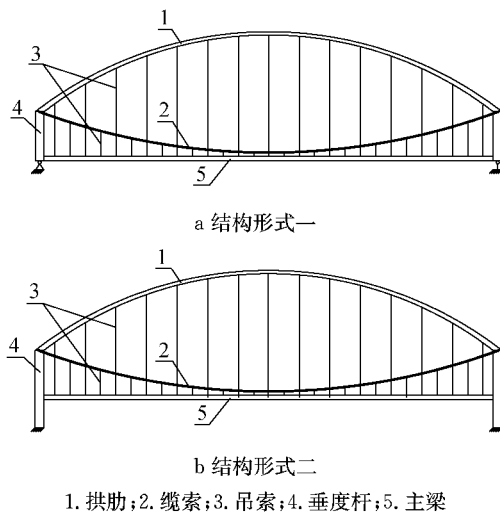


图 1 缆拱桥效果图

Fig.1 Effect diagram of the cable-arch bridge



1. 拱肋; 2. 缆索; 3. 吊索; 4. 垂度杆; 5. 主梁

图 2 缆拱桥的结构形式

Fig.2 Structural style of the cable-arch bridge

有拱座及锚室. 此外, 根据支承形式的不同缆拱桥可分为以下 2 种结构形式:

(1) 结构形式一. 拱与垂度杆、垂度杆与主梁分别固结, 形成一个框架结构并整体简支于墩台上, 构成完全无推力体系.

(2) 结构形式二. 主梁竖向支承于墩台上, 拱与垂度杆、垂度杆与墩台分别固结, 构成部分有推力体系.

本文将重点对缆拱桥结构形式一进行分析.

1.2 力学原理

缆拱桥主梁及桥面荷载由拱肋和缆索共同承担. 拱既是承重构件, 又起到锚碇的作用; 缆既是承重构件, 又起到系杆作用. 通过调整垂跨比可以调整荷载分担的比例, 当垂跨比减小时, 缆索锚固端水平角减小, 在承担竖向荷载不变的情况下水平张力增加, 故在保持垂度杆顶部无推力的状态下缆索承担的桥面荷载减小; 当垂跨比增大时情况则相反. 在恒载及活载共同作用下, 拱脚水平推力与缆索水平张力相平衡, 竖向合力由垂度杆传至墩台, 即

$$H_G + H_S + H_1 + H_2 = 0$$

式中: H_G 为恒载产生的拱脚水平推力; H_S 为恒载产生的缆索水平张力; H_1 为活载产生的拱脚水平推力; H_2 为活载产生的缆索水平张力.

在活载单独作用下, 荷载亦被拱肋和缆索分担, 垂度杆顶部仅会受到较小水平力作用, 该水平力通过垂度杆传至主梁, 由主梁轴力平衡, 即

$$H_1 + H_2 + N = 0$$

式中: N 为活载产生的主梁轴力.

2 结构性能

采用 Midas/Civil 软件对跨径 600 m 缆拱桥进行建模计算, 并与同样跨度、同样截面形式的梁拱固结系杆拱桥作对比分析.

2.1 计算参数

拱肋截面同上海卢浦大桥, 其形式如图 3 所示. 该截面为单箱双室截面, 上部呈矩形, 宽 5 m, 高 3~6 m; 下部呈倒马蹄形, 底部宽 3 m, 高 3 m. 拱肋内部各平面均设有数道纵向加劲肋以增强拱肋刚度. 拱肋及各主要构件参数见表 1.

缆拱桥总体布置简图及有限元模型如图 4 和图 5 所示. 拱肋矢高 100 m, 矢跨比 1/6, 两拱肋轴线间

表 1 构件参数

Tab.1 Component parameters

构件	截面形式	材料	单元类型	横截面积/m ²
拱肋	单箱双室变截面	Q235 钢	梁单元	0.773 0~0.893 0
主缆/系杆	圆形截面	1 770 MPa 高强钢丝	索单元	0.096 2
吊索	圆形截面	1 770 MPa 高强钢丝	索单元	0.007 9
主梁	箱形截面	Q235 钢	梁单元	2.068 0
风撑	箱形截面	Q235 钢	梁单元	0.357 0
垂度杆	矩形截面	C40 混凝土	梁单元	40.000 0

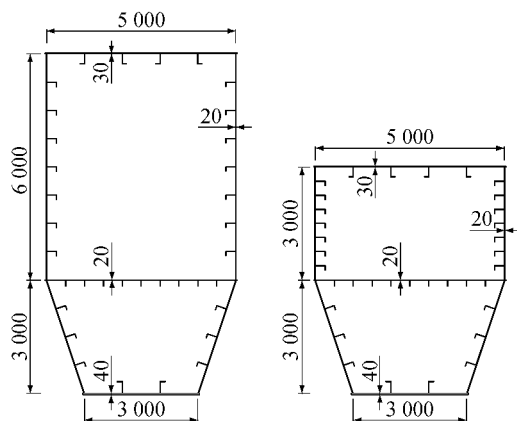


图 3 拱肋截面(单位:mm)

Fig.3 Cross section of the arch (unit:mm)

距 29 m;缆索垂度 53.176 m,垂跨比 1/11.283;吊索每隔 10 m 交错布置,跨中一对吊索布置于主缆.移动荷载按六车道布置,并提取跨中挠度的最不利移动荷载布置工况作为汽车荷载;温度荷载设置为初始温度 15℃,升温最终温度 46℃,降温最终温度 -3℃.各荷载工况如下所示:

- (1) 工况一,恒载+汽车荷载.
- (2) 工况二,恒载.
- (3) 工况三,汽车荷载.
- (4) 工况四,恒载+整体升温.
- (5) 工况五,恒载+整体降温.

对照模型为下承式梁拱固结系杆拱桥,荷载工况同缆拱桥,其整体布置简图及有限元模型分别如图 6 和图 7 所示.

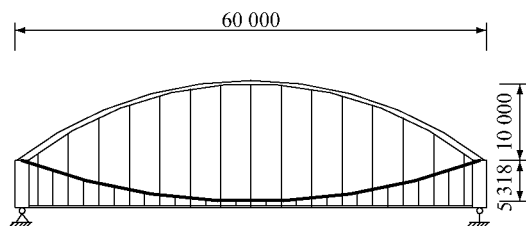


图 4 缆拱桥整体布置简图(单位:cm)

Fig.4 Overall arrangement of the cable-arch bridge (unit:cm)

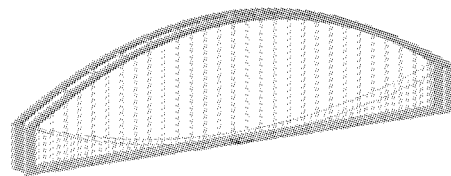


图 5 缆拱桥有限元模型

Fig.5 Finite element model of the cable-arch bridge

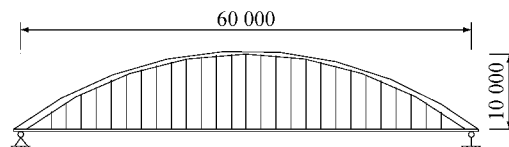


图 6 系杆拱整体布置简图(单位:cm)

Fig.6 Overall arrangement of the tied arch (unit:cm)

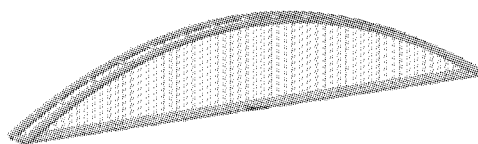


图 7 系杆拱有限元模型

Fig.7 Finite element model of the tied arch

2.2 结果分析

计算结果如表 2~6 及图 8~13 所示.

在工况一和工况二荷载的作用下,缆拱桥缆索分摊约 60%荷载,通过调整垂跨比改变荷载分配的比例.垂跨比减小会使缆索承担的荷载减小,拱脚水平推力和缆索水平张力增大,垂度杆高度减小;垂跨比增大影响则相反.与系杆拱桥相比,缆拱桥拱肋轴力下降,由轴压引起的应力随之下降;除工况一拱脚弯矩外,缆拱桥的拱脚和拱顶弯矩均大于系杆拱桥,由弯矩引起的应力随之增加.两者综合作用,使得缆拱桥拱肋应力值减小 10%~35%,承载能力有较大提高.缆拱桥缆索总长 1 224.75 m,较系杆拱桥的系杆长度增加 2.06%,其最大张力也远小于系杆拱桥的系杆拉力,若使两者达到相同的应力水平,缆拱桥的高强钢丝用量将大幅下降.

表 2 工况一、工况二计算结果

Tab.2 Caculation results of working condition 1 and 2

工况	桥型	拱脚最大应力/MPa	拱顶最大应力/MPa	拱脚轴力/kN	拱顶轴力/kN	拱脚弯矩/(kN·m)	拱顶弯矩/(kN·m)	缆索或系杆最大拉力/kN	缆索承担荷载比例/%
工况一	系杆拱桥	-110.32	-123.48	-90 151	-75 962	19 711.9	33 400.0	75 938.5	100.0
	缆拱桥	-98.83	-80.38	-61 640	-52 201	73 096.2	13 068.2	56 204.4	61.0
	变化率/%	-10.42	-34.90	-31.63	-31.28	270.82	-60.87	-25.99	
工况二	系杆拱桥	-103.89	-94.92	-84 656	-70 909	19 124.1	-3 444.9	75 515.5	100.0
	缆拱桥	-84.53	-74.50	-57 827	-48 590	51 731.0	-17 139.0	51 798.3	62.4
	变化率/%	-18.64	-21.51	-31.69	-31.48	170.50	397.52	-31.41	

注:变化率指缆拱桥计算结果的绝对值相对系杆拱桥增加或减少的百分比.

表 3 工况三计算结果

Tab.3 Calculation results of working condition 3

桥型	主梁轴力/kN	拱顶竖向位移/mm	跨中竖向位移/mm	支座水平位移/mm	拱脚水平位移/mm
系杆拱桥	9137.3	-257.6	-271.2	12.8	12.8
缆拱桥	-1 139.8	-283.2	-310.4	-2.3	38.2
变化率/%	-87.53	9.94	14.45	-82.03	198.44

表 4 温度荷载计算结果

Tab.4 Calculation results under temperature load

桥型	工况	拱脚最大应力/MPa	拱顶最大应力/MPa
系杆拱桥	工况四	-106.41	-94.92
	工况五	-105.14	-94.92
缆拱桥	工况四	-87.24	-74.45
	工况五	-85.72	-74.47

表 5 动力特性分析结果

Tab.5 Results of dynamic characteristics analysis

序号	频率/(rad · s ⁻¹)	振型
1	0.075 2	一阶反对称竖弯
2	0.137 4	拱肋一阶对称侧弯
3	0.296 8	拱肋一阶反对称侧弯
4	0.305 5	二阶反对称竖弯
5	0.330 4	一阶对称竖弯
6	0.403 0	缆索同向二阶对称侧弯
7	0.451 8	缆索反向二阶对称侧弯
8	0.511 7	二阶对称侧弯

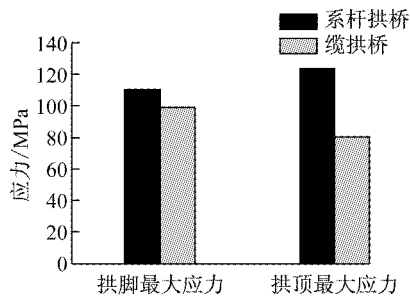


图 8 工况一应力

Fig.8 Stress of working condition 1

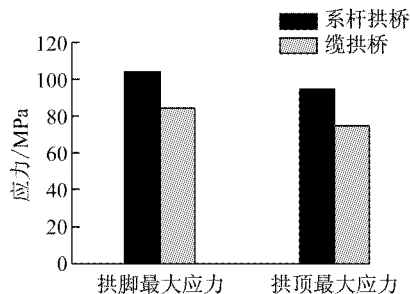


图 9 工况二应力

Fig.9 Stress of working condition 2

在工况三的荷载作用下,缆拱桥主梁承受的轴力和支座位移都远小于系杆拱桥. 由于缆拱桥荷载由拱肋和缆索共同承担,故刚度介于系杆拱桥和悬索桥之间,其跨中竖向位移较系杆拱桥增加

14.45%,但仍远小于拱桥规范 600 mm($L/1\ 000$)的要求.

由于系杆拱桥与缆拱桥均整体简支于墩台上,为外部静定结构,受温度影响较小. 在整体升温荷载作用下,2 种结构拱肋应力增幅均小于 3 MPa;在整体降温荷载作用下,2 种结构拱肋应力增幅均小于 1.5 MPa.

动力特性分析结果显示,缆拱桥基频为 0.075 2 Hz,周期为 13.292 s,振型为一阶反对称竖弯,其前八阶自振频率及振型见表 5.

屈曲分析结果显示(见表 6),缆拱桥稳定性相比系杆拱桥有较大提高,其第一模态临界荷载系数增大 66.74%,稳定系数提高 60.61%. 稳定性的大幅提高主要是缆索对稳定性较差的拱肋起到了卸载作用. 缆拱桥前 4 个模态均未发生面内失稳,其面内稳定性要远好于系杆拱桥.

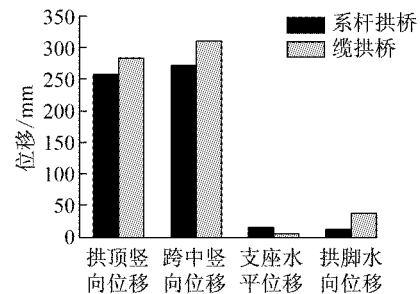


图 10 工况三位移

Fig.10 Displacement of working condition 3

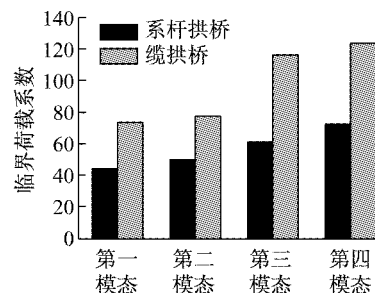


图 11 屈曲分析结果

Fig.11 Results of buckling analysis

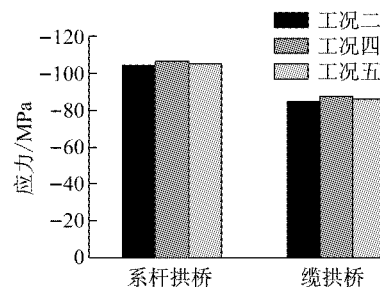


图 12 拱脚应力温度响应

Fig.12 Temperature response of arch foot stress

表 6 屈曲分析结果

Tab.6 Results of buckling analysis

模态	系杆拱桥			缆拱桥		
	临界荷载系数	稳定系数	屈曲类型	临界荷载系数	稳定系数	屈曲类型
第一模态	44.2	4.57	面外反对称	73.7	7.34	面外反对称
第二模态	49.9		面外正对称	77.3		面外正对称
第三模态	61.2		面内反对称	116.1		面外正对称
第四模态	72.2		面外反对称	123.5		面外反对称

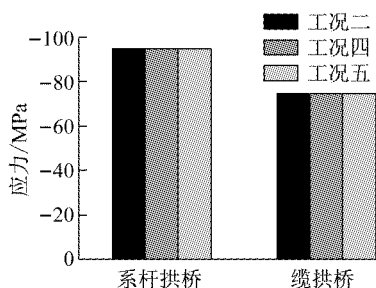


图 13 拱顶应力温度响应

Fig.13 Temperature response of arch roof stress

最大应力值相等时,缆拱桥的拱肋及缆索材料用量较系杆拱桥的拱肋及系杆均会有一定程度的减少,但由于缆拱桥相比系杆拱桥增加了垂度杆这一构件,故全桥造价的变化需要进一步综合分析。

(6) 缆拱桥比系杆拱桥稳定性提高 60.61%,缆拱桥稳定性大幅提高的原因主要是缆索对稳定性较差的拱肋起到了卸载作用。

综上所述,缆拱桥较高的稳定承载力和强度承载力为拱结构跨度的提升提供了新的有效途径。

3 结论

(1) 缆拱桥结构形式一为完全无推力体系,在恒载、活载作用下均不产生水平推力,对恶劣的地质条件具有很强的适应性。拱既是承重构件,又起到锚碇作用;缆既是承重构件,又起到系杆作用。在恒载和活载共同作用下,拱脚水平推力与缆索水平张力相等,主梁不承受轴力;在活载单独作用下,拱脚水平推力与缆索水平张力存在差值使垂度杆顶部受水平力作用并最终传至主梁。与系杆拱桥相比,该水平力减小 87.53%。

(2) 缆拱桥的拱肋与缆索共同分担荷载,其强度承载力较系杆拱桥有较大提高,适用于重载桥梁。在恒载和汽车荷载共同作用下,缆索承受 61.0% 荷载,与系杆拱桥相比,其拱脚应力减小 10.42%,拱顶应力减小 34.90%;在恒载单独作用下,拱肋承受 62.4% 荷载,与系杆拱桥相比,其拱脚应力减小 18.64%,拱顶应力减小 21.51%。

(3) 由于缆拱桥由拱肋与缆索共同作为承重结构,其刚度介于拱桥与悬索桥之间,在汽车荷载作用下其跨中竖向位移增加 14.45%,但仍远小于拱桥规范的限值要求。

(4) 缆拱桥为外部静定结构,受温度影响较小,在整体升温荷载作用下拱脚最大应力增大 3.21%,在整体降温荷载作用下拱脚最大应力增大 1.41%。

(5) 在跨度和主要构件截面形式相同时,缆拱桥拱肋应力低于系杆拱桥,缆索最大张力也低于系杆拱桥的系杆拉力。2 种结构的拱肋及缆索(系杆)

参考文献:

- [1] 肖汝诚. 桥梁结构体系[M]. 北京:人民交通出版,2013.
XIAO Rucheng. Bridge structural systems[M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [2] 余海燕,孙全胜. 斜拉拱式协作体系桥梁地震响应分析[J]. 世界桥梁,2016(5):67.
YU Haiyan, SUN Quansheng. Analysis of seismic response for bridge of combined arch and cable-stayed system[J]. World Bridges, 2016(5):67.
- [3] 王甜. 斜拉-悬吊协作体系桥梁设计关键问题研究[D]. 长沙:湖南大学,2015.
WANG Tian. Research on the key issues of cable-stayed suspension bridge design [D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [4] 孟续东. 1700 米主跨斜拉-悬索协作体系桥梁方案设计和静动力计算分析研究[D]. 成都:西南交通大学,2010.
MENG Xudong. Conceptual design and structural analysis of cable-stayed-suspension bridge with 1700 metres main span [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [5] 赵雷,黄灿,武芳文. 大跨度悬索拱桥极限承载能力研究[J]. 地震工程与工程振动,2008(3):116.
ZHAO Lei, HUANG Can, WU Fangwen. Study on ultimate load carrying capacity of long span suspension arch bridge[J]. Journal of Seismic Engineering and Engineering Vibration, 2008(3): 116.
- [6] 刘大庆. 自锚式悬索桥与上承式拱桥组合体系桥梁地震响应分析[D]. 成都:西南交通大学,2011.
LIU Daqing. The seismic response analysis of the system composited by self-anchored suspension bridge and deck arch bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [7] 王剑. 钢拱桥极限跨径研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.
WANG Jian. The study of ultimate spans for steel arch bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.

(下转第 1865 页)