

多层转运站结构的振动控制与加固分析

成祎民¹, 尚 鹏², 闫春生³

(1. 浙江工业大学工学部, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江省衢州市建筑工程管理处, 浙江 衢州 324000;

3. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为改进多层转运站结构设计, 提高多层转运站结构的抗振动能力, 研究了多层转运站结构的动力特性和动力响应。基于现场实测和调查, 分析了多层转运站结构在增设钢支撑和钢筋混凝土门式剪力墙两种振动控制方案下结构的动力特性和动力响应。研究表明: 以上两种加固方案均可减小结构发生共振的可能性并改善结构侧向变形的不均匀性。考虑施工工艺, 可优先选用增设钢筋混凝土“门式”剪力墙的加固方案。对未设置楼板的框架楼层, 也可增设“回”字形钢筋混凝土板, 在提高结构整体性的同时兼有控制楼盖振动的作用。

关键词: 转运站; 振动响应; 动力特性; “门式”剪力墙

中图分类号: TU366; TU311.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)01-0082-04

Analysis on vibration control and repair of truck and coal transporting trestle

CHENG Yimin¹, SHANG Peng², YAN Chunsheng³

(1. Department of Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Quzhou Construction Administration Bureau, Quzhou 324000, China;

3. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to improve the design and vibration-resistant capacity of multi-story transfer station, dynamic characteristics and responses of multi-story transfer station were studied. Based on the site test and investigations, two strengthening schemes such as adding steel braces and door-shape shear walls were conducted and the dynamic responses were calculated. It indicates that the adverse effects of the non-uniform deformation and multiple frequency resonance can be reduced by the both strengthening schemes. Considering construction technology, priority scheme is door-shape shear wall strengthening scheme. The closed concrete floor can be set at the floor level to improve the integrity of the structure and control the vibration of the floor.

Keywords: transfer station; vibration response; dynamic characteristics; door-shape shear wall

转运站是设在两台高架固定带式输送机之间的中转站, 它主要用于长距离运输过程的中间传递或改变物料的输送方向, 在工业运输中起着重要的枢纽作用。转运站多为敞开式空间框架结构, 结构本身高宽比较大, 层高不规则, 除设备层外其余各层通常不设置楼板, 属典型的高耸柔性结构; 而且皮带张力和动力设备扰力作为引发转运站结构振动的主要激振源, 均作用于结构较高部位^[1-3]。因此, 在抗振动方面, 无论是结构形式还是受力性质, 转运站结构都要比一般建筑结构不利得多。结构刚度较小, 过大且持续的振动都将降低结构的安全性、适用性和耐久性, 影响结构内部机器设备的工作性能和生产安全, 并会对操作和检修人员的舒适性甚至身体健康产生不利影响, 降低工作效率^[4-6]。

对转运站这一特殊结构的振动问题, 国内外尚没有系统的研究成果可以借鉴并应用于新建结构的设计和在役结构的加固维修。调查显示, 在我国钢铁企业中转运站绝大部分不能达到安全、经济使

用 50 年的要求, 特别是有振动设备的转运站结构在使用期间需要反复进行维修, 一般在 10~25 年间就要大修加固, 更有甚者因破坏严重, 不得不提前拆除重建, 严重影响了正常的生产秩序。结合典型工程案例, 对振动系统所受各种激励及所产生的响应之间的关系进行了探讨^[7-8], 提出了更加符合实际的转运站结构振动控制方法, 为新建转运站结构设计和在役转运站结构加固维修提供依据。

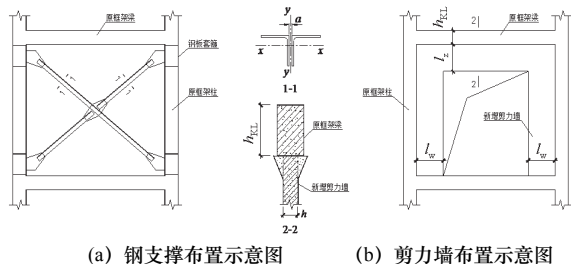
1 结构水平振动控制方法

对于钢筋混凝土框架结构, 提高结构水平抗侧刚度的常用加固方案主要有以下两种:

(1) 加设钢支撑。钢支撑宜采用双角钢交叉支撑, 通过钢板套箍与原框架构件可靠连接。钢支撑布置如图 1 (a) 所示。

(2) 增设钢筋混凝土“门式”剪力墙。考虑转运站与通廊接口布置、机器设备吊装和底部交通需要, 将后设剪力墙立面做成“门”形, 中部适当

开洞, 并与原框架采用锚筋或现浇钢筋混凝土套可靠连接, 形成框架—剪力墙结构. 剪力墙立面布置如图 1(b)所示.



(a) 钢支撑布置示意图 (b) 剪力墙布置示意图

图 1 钢筋混凝土框架加固方案示意图

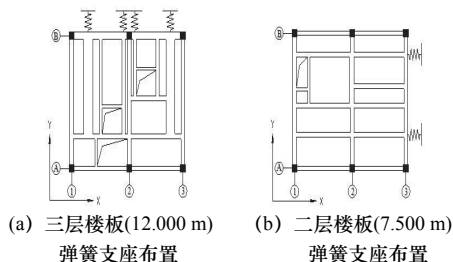
Fig.1 The schematic drawing of the strengthening scheme of reinforced concrete frame

2 多层转运站结构振动控制的力学模型及振动分析

2.1 力学模型的建立

转运站系某钢铁公司焦化厂煤料输送系统工程之一, 为四层六柱组成的钢筋混凝土框架结构, 转载单元为顶部两层, 转载方向为 90° . 结构平面布置规则, 横向轴线尺寸 $5.70\text{ m}+5.30\text{ m}$, 纵向轴线尺寸 8.70 m , 总高度 18.70 m , 一、二层敞开无围护结构, 一层 (标高 4.000 m 处) 无楼板, 三、四层局部外围由砌体填充并开设门窗洞口. 框架柱截面尺寸均为 $500\text{ mm}\times 500\text{ mm}$. 转运站在四层和三层分别与 R3、R4 通廊和 R5、R6 双机通廊相连. 四层布置 R3、R4 两台输送机机头、驱动电机及减速箱, 三层布置 R5、R6 两台输送机机尾.

结构建模分析采用 ETABS Non-linear V8.48 软件, 混凝土和钢材均采用线弹性、各向同性材料模型, 楼板单元选用膜单元 (Membrane), 膜厚度采用楼板厚度设计值. 为模拟钢桁架通廊的支撑作用, 在建立力学分析模型时将钢桁架通廊简化为四个 Y 方向的弹簧支座, 布置在转运站结构计算模型的相应位置; 同样, 对 R5、R6 双机通廊在 X 方向上做类似的简化处理, 如图 2 所示. 原结构剖面和计算模型见图 3(a)、图 3(b).



(a) 三层楼板(12.000 m) 弹簧支座布置 (b) 二层楼板(7.500 m) 弹簧支座布置

图 2 简化弹簧支座布置示意图

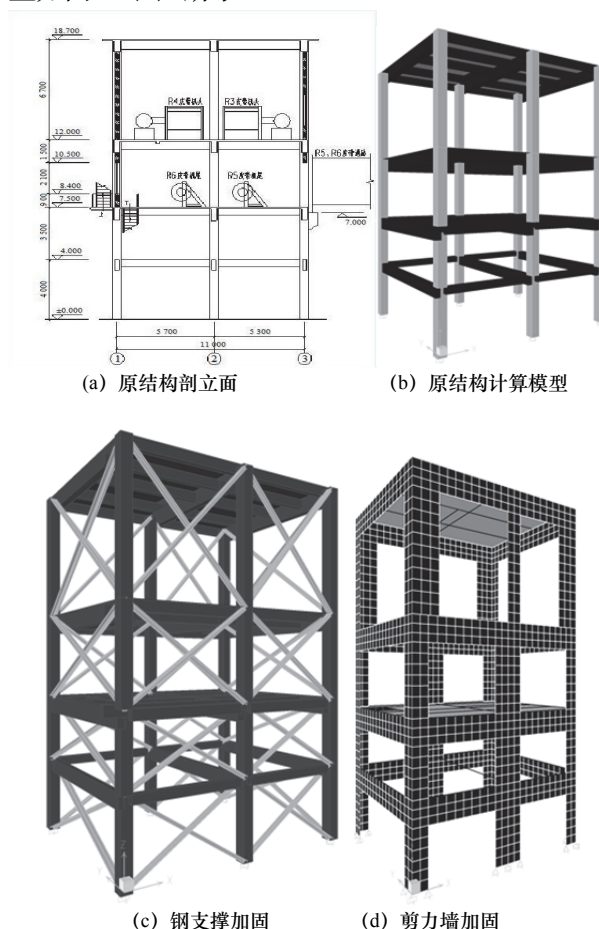
Fig.2 The schematic drawing of simplified spring support

(1) 钢支撑加固方案

在原框架结构外围柱间设置钢支撑, 建立计算模型, 支撑选用双角钢 $2\text{L } 160\times 10$ ($a=8\text{ mm}$), 钢材牌号为 Q235-B, 计算模型如图 3(c)所示.

(2) 钢筋混凝土剪力墙加固方案

在原框架结构外围柱间增设钢筋混凝土剪力墙, 混凝土强度等级为 C30. 新增的剪力墙厚度 $h=250\text{ mm}$, 墙肢宽 $l_w=600\text{ mm}$ (四层 AB 轴两端墙肢宽 $1\,200\text{ mm}$), 连梁高 $l_z=(1\,200-h_{KL})\text{ mm}$, h_{KL} 为新增连梁顶部原框架梁的截面高度. 考虑工艺要求, 建模时在通廊入口和设备吊装入口处适当改变剪力墙墙肢的宽度, 墙体单元选用壳单元 (Shell), 控制最大剖分尺寸为 500 mm . 计算模型如图 3 (d) 所示.



(c) 钢支撑加固 (d) 剪力墙加固

图 3 多层转运站原结构及两种加固方案计算模型

Fig.3 The original structure and computing models of two strengthening schemes

2.2 两种加固方案的动力分析

(1) 两种加固方案的效果评价

将原结构和两种加固方案的基本自振频率对比情况列于表 1, 将原结构和两种加固方案在静荷载及 1.70 Hz 激振力作用下各参考点的水平位移、加速度幅值计算结果列于表 2 排-表 7, 比较两种方案的加固效果.

表 1 原结构和两种加固方案的基本自振频率计算结果对比
Tab.1 Comparison of vibration frequency between original structure and strengthening schemes

方向	原结构	钢支撑加固方案		剪力墙加固方案	
	基频/Hz	基频/Hz	增幅/%	基频/Hz	增幅/%
Y	2.56	5.26	102.36	4.51	73.42
X	1.61	4.70	192.57	4.87	203.02

表 2 原结构及加固方案在 Y 向静荷载作用下的水平位移
Tab.2 Horizontal displacements of original structure and strengthening schemes under static loading in Y direction

参考点	标高/m	R3、R4 作用下 Y 向			加固后位移降低		
		水平位移/mm			幅度/%		
		原结构	设钢 支撑	设剪 力墙	原结 构	设钢 支撑	设剪 力墙
D4	18.70	0.802	0.735	0.672	—	8.35	16.21
D3	12.00	0.751	0.619	0.558	—	17.58	25.70
D2	7.50	0.453	0.361	0.302	—	20.31	33.33
D1	4.00	0.210	0.171	0.134	—	18.57	36.19

表 3 原结构及加固方案在 X 向静荷载作用下的水平位移
Tab.3 Horizontal displacements of original structure and strengthening schemes under static loading in X direction

参考点	标高/m	R5、R6 作用下 X 向			加固后位移降		
		水平位移/mm			低幅度/%		
		原结构	设钢 支撑	设剪 力墙	原结 构	设钢 支撑	设剪 力墙
D4	18.70	0.771	0.376	0.216	—	51.23	71.98
D3	12.00	0.607	0.265	0.158	—	56.34	73.97
D2	7.50	0.455	0.190	0.113	—	58.24	75.16
D1	4.00	0.257	0.083	0.054	—	67.70	78.99

表 4 原结构及加固方案在 Y 向 1.70 Hz 激振力作用下的水平位移幅值

Tab.4 Horizontal displacements of original structure and strengthening schemes under 1.70 Hz exciting force in Y direction

参考点	标高/m	R3、R4 作用下 Y 向			加固后位移降低幅度		
		水平位移/mm			/%		
		原结构	设钢 支撑	设剪 力墙	原结 构	设钢 支撑	设剪 力墙
D4	18.70	1.375	0.896	0.869	—	34.84	36.80
D3	12.00	1.005	0.681	0.603	—	32.24	40.00
D2	7.50	0.825	0.487	0.384	—	40.97	53.45
D1	4.00	0.451	0.252	0.179	—	44.12	60.31

表 5 原结构及加固方案在 X 向 1.70 Hz 激振力作用下的水平位移幅值

Tab.5 Horizontal displacements of original structure and strengthening schemes under 1.70 Hz exciting force in X direction

参考点	标 高 /m	R5、R6 作用下 X 向			加固后位移降低		
		水平位移/mm			幅度/%		
		原结构	设钢 支撑	设剪 力墙	原结构	设钢 支撑	设剪 力墙
D4	18.70	3.996	0.475	0.278	—	88.11	93.04
D3	12.00	2.555	0.336	0.201	—	86.85	92.13
D2	7.50	0.831	0.231	0.138	—	72.20	83.39
D1	4.00	0.275	0.104	0.067	—	62.18	76.64

表 6 原结构及加固方案在 Y 向 1.70 Hz 激振力作用下的水平加速度幅值

Tab.6 The amplitude of horizontal acceleration of original structure and strengthening schemes under 1.70 Hz exciting force in Y direction

参考点	标高/m	R3、R4 作用下 Y 向			加固后加速度降低		
		加速度幅值/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$			幅度/%		
		原结 构	设钢 支撑	设剪 力墙	原结 构	设钢 支撑	设剪 力墙
D4	18.70	0.157	0.102	0.099	—	35.03	36.94
D3	12.00	0.115	0.078	0.069	—	32.17	40.00
D2	7.50	0.094	0.056	0.044	—	40.43	53.19
D1	4.00	0.051	0.029	0.020	—	43.14	60.78

表 7 原结构及加固方案在 X 向 1.70 Hz 激振力作用下的水平加速度幅值

Tab.7 The amplitude of horizontal acceleration of original structure and strengthening schemes under 1.70 Hz exciting force in X direction

参考点	标高/m	R5、R6 作用下 X 向			加固后加速度降低		
		加速度幅值/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$			幅度/%		
		原结构	设钢 支撑	设剪 力墙	原结 构	设钢 支撑	设剪 力墙
D4	18.70	0.456	0.054	0.032	—	88.16	92.98
D3	12.00	0.291	0.038	0.023	—	86.94	92.10
D2	7.50	0.095	0.026	0.016	—	72.63	83.16
D1	4.00	0.031	0.012	0.008	—	61.29	74.19

从上述计算结果可以看出：

(1) 增设钢支撑或钢筋混凝土剪力墙，均能有效提高结构的侧向刚度，结构加固后的自振频率可以避开 1.00~2.23 Hz 低频动力设备的振动频率，防止共振现象的发生。

(2) 两种加固方案均能使结构水平振动位移幅值、加速度幅值得到有效控制。加固后，在 1.70 Hz 的转运站振动频率处，结构各层水平振动位移幅值控制在安全极限标准 0.90 mm 以内；各层水平加速度幅值控制在人体舒适性界限标准 0.26 m/s^2 以下。

(3) 钢支撑加固是一种干作业法，施工简便快捷，基本不影响正常的生产活动。对于跨度和层高较小的结构，钢支撑加固效果较好；当结构跨度和层高较大时，所需钢支撑长度增加，其刚度相对降低；且以往的工程加固经验表明，该方法不易保证钢板套箍与原结构构件连接的紧密性和牢固性；同时，受生产工艺和结构底部交通的限制，钢支撑通常不能做到均匀布置，加固效果难以保证。

(4) 采用钢筋混凝土剪力墙加固，工序复杂、工期较长，同时施工过程会影响正常的生产活动。但采用剪力墙加固可以根据生产工艺和结构底部交通的需要灵活改变布置形式；钢筋混凝土剪力墙的侧向刚度较大，且与原有结构能够可靠连接，

使两者在动荷载作用下协同工作。

(5) 原结构各楼层参考点的最大水平位移对应激振频率不一致, 水平力作用下结构侧向变形不均匀, 如图 4 (a) 和图 5 (a) 所示。加固后, 由于结构整体刚度提高, 弹簧支座对结构局部楼层刚度的改变不再明显, 表现为结构各层频率—位移曲

线波峰均对应于相同的激振力频率, 同时结构侧向变形趋于均匀, 如图 4 (b)、(c) 和 5 (b)、(c) 所示。图 4 和图 5 表示考虑通廊水平支撑作用时, 1.0~5.0 Hz 频率段简谐水平激振力作用下结构在 Y 方向和 X 方向的共振频率及相应各参考点的位移幅值。

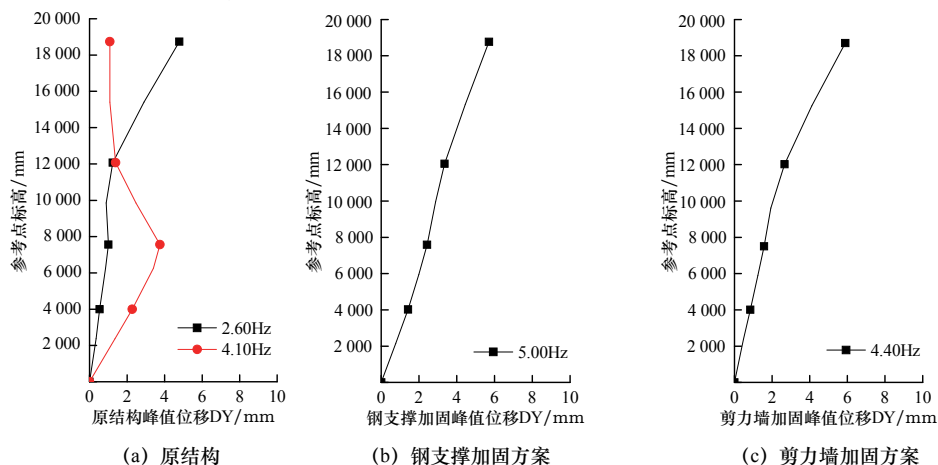


图 4 R3、R4 (水平力标高 12.000 m) 作用下 Y 方向的共振频率及参考点峰值位移
Fig.4 Resonance frequency and peak displacement in Y direction under R3, R4 excitation

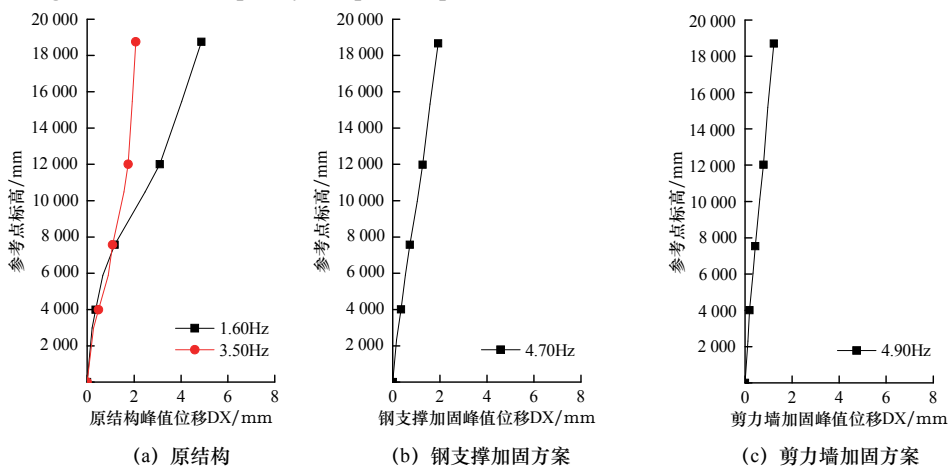


图 5 R5、R6 (水平力标高 7.500 m) 作用下 X 方向的共振频率及参考点峰值位移
Fig.5 Resonance frequency and peak displacement in X direction under R5, R6 excitation

3 结论

(1) 多层转运站结构自身刚度较低及由于通廊的作用导致结构局部刚度改变, 结构在计算频段 (0.5~5.0 Hz) 内的多个频率点发生共振现象, 设置交叉钢支撑或钢筋混凝土剪力墙两种加固方案均可改善多频率点发生共振和结构侧向变形不均匀现象。

(2) 虽然在原框架柱柱间均匀增设交叉钢支撑或钢筋混凝土剪力墙, 均可有效提高结构的整体刚度, 减小结构水平位移, 但受生产工艺、结构底部交通等条件限制, 钢支撑往往不能保证均匀布置, 建议优先选用钢筋混凝土“门式”剪力墙加固方案。

(3) 一般情况下, 只要采用的梁板刚度不低于界限刚度, 即可不考虑楼盖的竖向振动问题。对没有设置楼板的楼层, 可依附原有框架梁增设“回”字形钢筋混凝土板, 提高结构的整体性的同时加强对结构整体的竖向振动控制。

参考文献 References

- [1] 徐建. 建筑振动工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
XU Jian. Handbook of building vibration engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [2] 李国强, 李杰. 工程结构动力检测理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
LI Guoqiang, LI Jie. Dynamic test theories and its applications of engineering structures [M]. Beijing: Science Press, 2002.

- [3] 李德葆, 陆秋海. 工程振动试验分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
LI Debao, LU Qiuhai. Analysis of engineering vibration test[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [4] YOSHIDA I, KUROSE H, FUKUI S, et al. Parameter identification on active control of a structural model[J]. Smart Materials and Structures, 1995, 4(1): 82-90.
- [5] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of structures[M]. 2nd edition (revised). Computers and Structures Inc., 2003.
- [6] WILSON E L. Static and dynamic analysis of structures[M]. 4th edition (revised). Computers and Structures Inc., 2004.
- [7] 徐忠根, 陈荣毅. 某工业厂房的检测与减振加固[J]. 四川建筑科学研究, 2004, 30(1): 48-51.
XU Zhonggen, CHEN Rongyi. Inspection and vibration-reduction strengthening of a industrial building [J]. Sichuan Building Science, 2004, 30(1): 48-51.
- [8] 北村春幸. 基于性能设计的建筑振动解析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
KITAMURA H K. Performance design-based vibration analysis of buildings[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004.

(本文编辑 吴海西)

(上接第81页)

- [4] 吕跃进. 指数标度判断矩阵的一致性检验方法[J]. 统计与决策, 2006(18): 31-32.
LV Yuejin. Consistency test method of exponential scale judgement matrix[J]. Statistics and Decision, 2006(18): 31-32.
- [5] YI Guangwang, QIN Huali. Fuzzy comprehensive evaluation of fire risk on high-rise buildings[J]. Procedia Engineering, 2011(10): 64-90.
- [6] WEI Bing, WANG Songling, LI Li. Fuzzy comprehensive evaluation of district heating systems[J]. Energy Policy, 2010(10): 113-124.
- [7] GU Xiangbai. Hierarchy probability cost analysis model incorporate MAIMS principle for EPC project cost estimation[J]. Expert Systems with Applications, 2011(07): 92-97.
- [8] TAEWOO Nam, KEUNHYUK Yeom. Business-aware framework for supporting RFID-enabled applications in EPC Network[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2011(3): 34-44.
- [9] Adrian Georgescu, Nicoleta Alexandru, Andrei Constantinescu, et al. The promise of EPC-based therapies on vascular dysfunction in diabetes[J]. European Journal of Pharmacology, 2011(13): 121-132.

(本文编辑 沈波)

中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊 收录证书

西安建筑科技大学学报. 自然科学版

依据文献计量学的理论和方法, 通过定量与定性相结合的综合评审,
贵刊被收录为中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊, 特颁发此证书。

证书编号: CSCD2013C-0746

有效期: 2013年-2014年

发证日期: 2013年7月

查询网址: www.sciencechina.ac.cn

中国科学院文献情报中心
中国科学引文数据库
引文数据库