

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2022.01.011

地铁车站顶板上翻梁结构设计优化

卓少琳¹, 黄文金¹, 温银龙^{1,2}, 林本清¹, 朱志勇³

(1. 福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350108;

2. 福建省交通规划设计有限公司, 福建 福州 350004;

3. 福州市城乡建设局, 福建 福州 350001)

摘要: 为了解决地铁车站顶板上翻梁构造引起的上方基坑回填施工困难和管线覆土厚度不足等问题, 对地铁车站顶板结构设计进行优化。在充分利用地铁车站结构空间效应和组合梁结构优势的基础上, 结合顶板构造特点和施工工艺要求, 采用 H 型钢混凝土组合梁代替传统钢筋混凝土梁, 并进行了承载能力和正常使用极限状态验算。结构设计优化结果表明, 在降低梁高的前提下, 采用组合梁方案既可以提高梁-柱节点的整体性, 改善顶板的抗裂性, 也为改善车站基坑回填施工条件、提高施工质量创造有利条件。

关键词: 地铁车站; 型钢混凝土梁; 空间效应; 倒 T 型截面; 设计优化

中图分类号: U448.25

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2022)01-0068-06

Structural design optimization of inverted T-shaped beam in stop floor of metrostations

ZHUO Shaolin¹, HUANG Wenjin¹, WEN Yinlong^{1,2}, LIN Benqing¹, ZHU Zhiyong³

(1. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Communications Planning & Design Institute Co., Ltd, Fuzhou 350004, China;

3. Fuzhou Urban and Rural Construction Bureau, Fuzhou 350001, China)

Abstract: In order to solve the problems in the backfilling of the upper foundation pit and insufficient thickness of covering soil for the pipelines, which were caused by the construction of the inverted T-shaped beam on the metro station roof, the structural design of metro station roof was optimized. On the basis of making full use of the spatial effect of metro station structure and the advantages of composite beam structure, combined with the characteristics of roof structure and construction process requirements, the H-shaped steel reinforced concrete composite beam was used to replace the traditional reinforced concrete beam, and the ultimate limit states as well as the serviceability limit states were checked. Results of structural design optimization show that, on the premise of reducing the beam height, using the composite beam scheme can not only improve the integrity of beam-column joints and the crack resistance of the roof, but also create favorable conditions for improving the backfill construction conditions of the station foundation pit and improving the construction quality.

Keywords: metro station; steel reinforced concrete beam; spatial effect; inverted T section; design optimization

地铁车站普遍采用设置纵梁的地下箱型截面框架结构体系^[1-2], 顶板纵梁为了方便管线布置通常采用上翻梁的结构形式^[3]。地铁车站抗浮

及预留市政管线埋设空间等往往要求顶板覆土的厚度很大, 而为了满足顶板纵梁承载的需要, 上翻梁截面又很高, 导致其上方实际覆土厚度并不大。

收稿日期: 2022-01-20

基金项目: 福建省交通运输科技项目(201905)

第一作者简介: 卓少琳(1997—), 女, 福建莆田人, 硕士研究生, 研究方向: 组合结构。

通信作者: 黄文金(1975—), 男, 福建莆田人, 副教授, 博士, 研究方向: 组合结构桥梁。

且顶板纵梁上凸的构造形式把基坑分割成几个小区域,不利于回填土的碾压施工,容易导致市政管线在路面施工和使用过程中受损,既增加了基坑回填施工的难度和造价,也降低了路基回填质量,最终导致路面出现不均匀沉降甚至发生开裂^[4-5]。

近年来,关于地铁车站结构受力分析一直是研究热点之一,特别是针对地铁车站受力计算的假定和有限元建模的简化,如对空间模型与平面模型进行对比分析^[6-9],但对顶板纵梁却鲜有研究^[4,10]。为此,本研究结合福州地铁 2 号线某车站顶板纵梁,研究地铁车站顶板纵梁的空间效应和设计富余度,提出采用型钢混凝土组合梁的设计方案,以降低顶板纵梁上翻高度且改善顶板受力性能,从源头上解决基坑回填质量问题。

1 原结构设计方案简介

背景工程为福州地铁 2 号线某地下两层岛式车站,标准段宽 19.7 m,深约 16.4 m,为地下两层单柱双跨式。混凝土强度等级除结构柱采用 C50 外,其它均采用 C35。车站结构如图 1 所示。顶板覆土厚度为 3 m,纵梁高度为 1.8 m 而上翻 1 m,市政管线上方覆土厚度仅为《地铁设计规范》^[11]要求的最低值 1 m。

2 原结构设计方案内力分析

地铁车站结构设计一般采用平面模型,没有考虑空间效应。已有的空间模型分析结果表明,顶板纵梁结构设计存在 18%~24% 的优化空间^[7,10]。为了掌握该地铁车站结构的空 间 受 力 性 能,合 理 利 用 结 构 的 承 载 能 力,需 要 对 已 有 车 站 顶 板 结 构 设 计 的 富 余 度 进 行 准 确 分 析,故 建 立 精 细 有 限 元 模 型 并 细 化 荷 载 工 况,重 新 计 算,并 与 设 计 院 的 平 面 模 型 计 算 结 果 对 比 分 析。

2.1 有限元建模方法

应用有限元软件 MidasGen 和 ABAQUS 分别建立了平面和空间模型,如图 2 所示。在平面模型中,先将框架柱根据刚度等效原则换算为连续的中墙,再沿行车方向取一延米建立平面框架结构,板、柱、侧墙、地连墙均采用梁单元;在空间模型中,车站结构沿行车方向选取标准段 5 跨,板、柱、侧墙、纵梁以及节点域的渐变构造均采用实体单元;结构与地连墙、周围土体的相互作用均采用

土弹簧进行模拟。

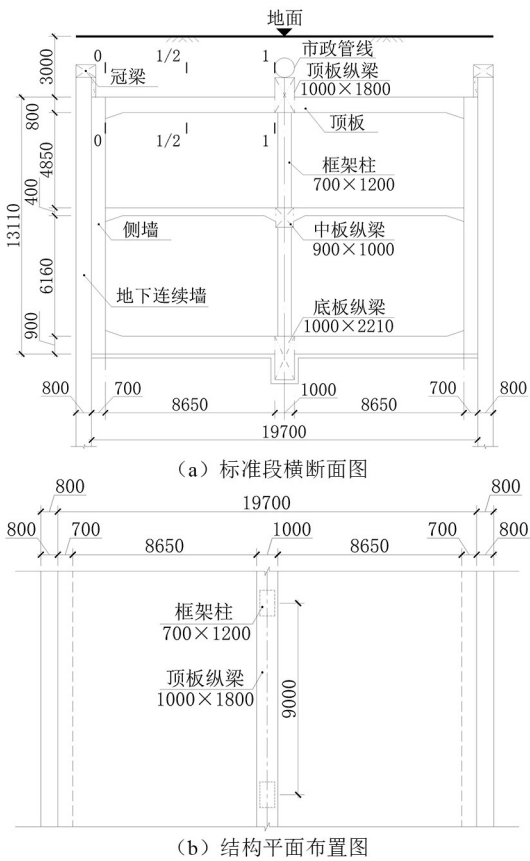


图 1 地铁车站结构示意图(单位:mm)
Fig.1 Structural diagram of metro station (unit: mm)

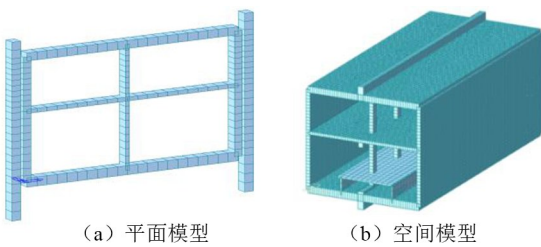


图 2 有限元模型示意图
Fig.2 Schematic diagram of finite element model

作用于车站标准断面的荷载状况如表 1 所示。由于车站结构施工周期长,且一直埋藏于地下,混凝土的收缩徐变和温度变化基本稳定,对结构受力影响小,计算时不予考虑。荷载按照《地铁设计规范》和《建筑结构荷载规范》^[12]规定组合。

已有文献关于地下结构的空间效应计算结果差别较大,这既与有关文献对荷载工况和控制截面定义不一致有关,也与其有限元模型网格质量

有关。空间模型里,网格质量对有限元计算结果影响很大,所以要将网格尺寸控制在一定的范围内,使之既能保证软件运行的速度,又能满足模拟的精度要求。在建模时通过对不同的网格划分方式进行试算及分析,以期找到合适的网格尺寸。综合精确度与耗时,上翻梁和其他构件的网格尺寸分别为 180 mm 和 300 mm,能达到较理想的效果。

表 1 荷载状况

Tab.1 Load condition

荷载类型	荷载名称	荷载取值(说明)
永久荷载	结构自重	构件重量,钢筋混凝土重度 $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$
	覆土压力	按土层力学参数和最大厚度计算
	设备荷载	按标准值 8 kPa 计
	地下水及浮力	按最不利水位计算
可变荷载	地面超载	一般按 20 kPa 均布活载
	人群荷载	楼面人群荷载取 4 kPa
	侧向土压力	使用阶段按静止土压力计算
偶然荷载	地震作用	设防烈度 7 度
	人防荷载	人防 6 级

2.2 有限元计算结果分析

顶板、纵梁与侧墙和立柱形成框架结构共同承担上方荷载,顶板和纵梁内力沿纵向(行车方向)分布不均匀。空间模型计算的顶板弯矩和剪力见图 3。

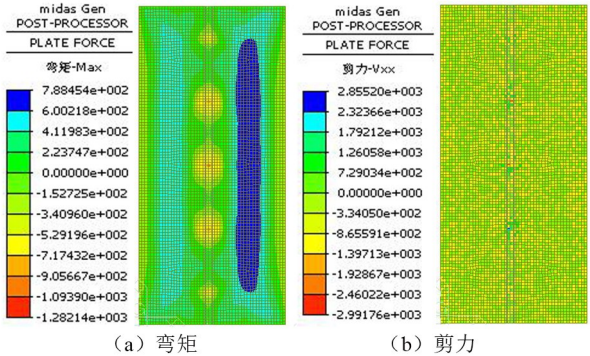


图 3 顶板内力分布云图(单位:kPa)

Fig.3 Cloud map of the roof's internal forces
(unit: kPa)

为了便于比较分析空间和平面模型计算的内力,选择车站结构顶板的侧墙支点、跨中和柱顶 3 个控制截面(见图 1 的 0-0,1/2-1/2,1-1)的横向弯矩(垂直于行车方向) M_0 、 $M_{1/2}$ 、 M_1 ,及其对应的竖向剪力 Q_0 、 Q_1 ,计算结果见表 2。

表 2 车站顶板内力计算对比表

Tab.2 Comparison of station roof internal forces

类别	位置	$M/(\text{kN} \cdot \text{m})$			Q/kN	
		M_0	$M_{1/2}$	M_1	Q_0	Q_1
平面模型(P)	跨中	678.4	531.7	1 387.0	584.8	736.4
	柱顶	678.4	531.7	1 387.0	584.8	736.4
空间模型(S)	跨中	365.7	392.7	772.0	375.5	330.5
	柱顶	359.1	407.6	876.1	454.5	932.3
(P - S)/S	跨中	86%	35%	80%	56%	123%
	柱顶	89%	26%	58%	29%	-20%

由表 2 可知,空间模型的弯矩计算结果均小于平面模型,其中最大差值为 89%,位于侧墙处的 M_0 ;最小差值为 26%,位于跨中处的 $M_{1/2}$ 。两者剪力计算差值为-20%~123%,均发生在柱顶,说明未考虑空间效应的平面模型可能低估柱顶处的顶板剪力,应值得注意。由此可见,采用平面模型进行的顶板结构设计存在很大的优化空间,顶板弯矩设计富余度大,而剪力则需要考虑空间效应进行精确计算。

对于顶板纵梁,两种模型计算的纵梁纵向(平行于行车方向)弯矩和竖向剪力见表 3。

表 3 顶板纵梁内力

Tab.3 Internal forces of the roof's longitudinal beam

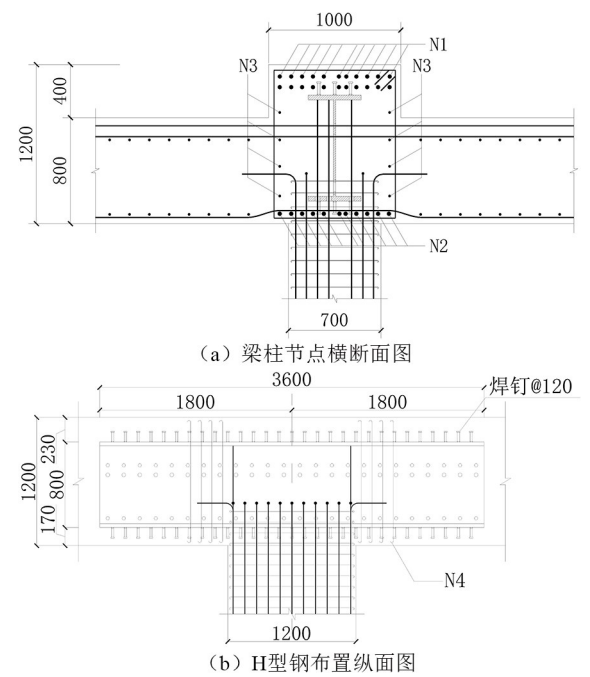
类别	$M/(\text{kN} \cdot \text{m})$		Q/kN
	支座	跨中	支座
平面模型(P)	8 873.6	4 436.5	6 263.2
空间模型(S)	5 832.3	3 298.2	5 369.3
(P - S)/S	52%	35%	17%

由表 3 可知,空间模型计算的内力均比平面模型的小,弯矩差值最小为 35%,剪力差值为 17%,表明采用平面模型进行的纵梁结构设计存在很大的优化空间,纵梁内力尤其是弯矩设计富余度大,可对纵梁结构设计进行优化以降低截面高度。

3 优化方案设计及验算

3.1 优化方案设计

为了降低顶板纵梁截面高度,但又不能显著降低其抗剪承载力,采用 H 型钢加劲,即采用 H 型钢混凝土组合梁,纵梁高度由 1 800 mm 减小为 1 200 mm,见图 4。H 型钢选用《焊接 H 型钢》^[13] 中的 WH800×400 焊接 H 型钢。为了节省用钢,并便利板筋放样,仅在柱节点向柱节间延伸 1.8 m (1/5 柱间距) 范围内布置 H 型钢。



注:图中 N1、N2 为 HRB400C_E32 钢筋,其横向间距为 87 mm,纵向间距为 80 mm; N3 为 HRB400C_E28 钢筋,其纵向间距为 198 mm; N4 为 HRB400C14@100/200 的箍筋。

图 4 H 型钢混凝土组合梁截面配筋图(单位:mm)
Fig.4 Sectional reinforcement diagram of H-shaped steel-concrete composite beam(unit: mm)

框架柱-顶板-纵梁节点处众多钢筋相交,为了满足钢筋连续贯通的构造要求,保证节点的承载力,H 型钢下翼缘开圆孔以便于柱筋向纵梁延伸锚固,腹板开圆孔以便于板筋横向贯穿,开孔直径及间距采用文献[14]中的通用尺寸,其中,板底筋自然弯曲排布于梁底纵筋之上。为了增加 H 型钢与混凝土的黏结力,在 H 型钢翼缘板上焊接规格为 φ19×100 的圆柱头焊钉,纵横向间距均为 120 mm。组合梁截面的局部三维效果图见图 5。

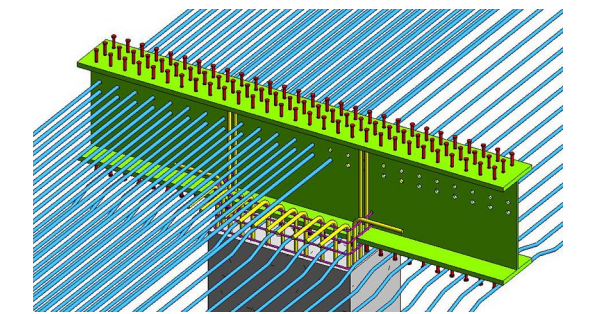


图 5 上翻梁局部三维构造
Fig.5 Local 3D configuration of inverted-T shaped beam

优化方案与原方案的配筋情况见表 4。

表 4 两种方案配筋汇总				
Tab.4 Summary of reinforcement for two schemes				
设计 方案	结构 位置	主筋/ mm	箍筋/ mm	截面含 钢率/%
原方案	跨中	17C _E 32	10C14@200	0.76
	支座	22C _E 32	57C14@100	0.98
优化 方案	跨中	15C _E 32	19C14@200	1.01
	支座	22C _E 32+ H 型钢+栓钉	39C14@100	4.85

3.2 承载力极限状态计算

优化方案将顶板纵梁改为 H 型钢加劲的型钢混凝土梁,梁中 H 型钢及钢筋混凝土协同受力,进一步提高抗弯和抗剪承载力。

(1) 正截面承载力计算

《钢骨混凝土结构技术规程》^[15] 第 6.2.1 条规定,对于对称配置实腹式钢骨的钢骨混凝土梁,其正截面抗弯承载力应满足式 1 要求:

$$M \leq M_{by}^{ss} + M_{bu}^{rc} \tag{1}$$

式中, M 为弯矩设计值; M_{by}^{ss} 为梁中钢骨部分即 H 型钢 WH800×400 的抗弯承载力, $M_{by}^{ss} = \gamma_s W_{ss} f_{ssy}$; M_{bu}^{rc} 为梁中钢筋混凝土部分,即 1 000×1 200 矩形截面的抗弯承载力。优化方案的正截面抗弯承载力计算结果见表 5。

(2) 斜截面承载力计算

在柱顶处,纵梁为钢骨混凝土梁,抗剪承载力根据《钢骨混凝土结构技术规程》第 6.2.4 条规定应满足:

$$V_b \leq V_{by}^{ss} + V_{bu}^{rc} \tag{2}$$

表 5 优化方案顶板纵梁承载力计算表

Tab.5 Table for calculating the bearing capacity of the roof longitudinal beam of the optimized scheme								
内力	控制 截面	截面承载力 R				内力 设计值 S	截面承载力复核	
		钢筋混凝 土部分 R_{rc}	钢骨 部分 R_{ss}	合计 ($R_{rc} + R_{ss}$)	(R_{ss}/S)/ %		(S/R) / %	是否满足 要求
弯矩/ (kN · m)	柱顶	5 353	2 540	7 893	44	5 832	73	是
	跨中	4 647	—	4 647	—	3 298	71	是
剪力/ kN	柱顶	4 234	1 456	5 690	27	5 369	94	是
	跨中	3 759	—	3 759	—	3 095	82	是

式中, V_b 为梁的剪力设计值; V_{by}^{ss} 为梁中钢骨部分即 H 型钢的抗剪承载力; V_{bu}^{rc} 为梁中钢筋混凝土部分即 1 000×1 200 矩形截面的抗剪承载力。在跨中,纵梁没有配置 H 型钢,其抗剪承载力根据《混凝土结构设计规范》^[16]第 6.3.4 条规定应满足式 3 要求:

$$V_b \leq V_{cs} + V_p \tag{3}$$

式中, V_{cs} 为梁中混凝土部分即 1 000×1 200 矩形截面的抗剪承载力; V_p 为梁中箍筋部分即 N4(见图 4) 的抗剪承载力。优化方案的斜截面抗剪承载力计算结果见表 5。

由表 5 可知,优化方案中的 H 型钢抗弯、抗剪承载力分别为 2 540 kN · m 和 1 456 kN,各占内力设计值的 44% 和 27%。仅降低梁高的情况下,钢筋混凝土梁无法满足结构的抗弯和抗剪设计要求。H 型钢的加劲,使优化方案比原方案在降低 1/3 梁高的前提下仍能满足承载能力极限状态设计要求,特别是对结构抗剪承载力做出贡献。

3.3 正常使用极限状态验算

现行地铁车站结构设计主要由正常使用极限状态进行控制,对控制裂缝宽度与刚度尤为重视。型钢混凝土组合梁的裂缝和刚度应根据《组合结构设计规范》^[17]的有关条文进行验算,结果见表 6。

由表 6 可知,原方案的顶板在柱顶处的裂缝宽度为 0.27 mm,大于规范容许值的 0.20 mm,不满足设计要求,而优化方案的挠度和裂缝宽度都满足设计要求。由于顶板在柱顶处的裂缝属于临水面裂缝,优化方案可显著改善顶板的抗裂性,这

对地铁车站抗渗有重要意义。

表 6 顶板纵梁挠度、裂缝宽度验算表
Tab.6 Table for checking the deflection and crack width of the roof's longitudinal beam

设计 方案	验算 项目	控制 截面	有限元计算 值 S /mm	规范容许 值 C /mm	S/C
原方案	挠度	跨中	28.6	36.0	0.79
	裂缝	跨中	0.23	0.30	0.77
	宽度	柱顶	0.27	0.20	1.35
优化 方案	挠度	跨中	14.9	36.0	0.41
	裂缝	跨中	0.27	0.30	0.90
	宽度	柱顶	0.18	0.20	0.90

4 结论

1) 对比精细空间模型与平面模型计算结果发现:地铁车站结构空间效应明显,原设计方案计算弯矩存在至少 20% 的优化空间,但支座处的剪力计算偏低。

2) 采用 H 型钢混凝土组合梁代替普通钢筋混凝土梁的方法可降低顶板纵梁 60% 的上翻高度,可有效解决原方案中市政管线覆土厚度不足的问题。此外,优化方案可减小顶板纵梁的钢筋和混凝土用量。

3) H 型钢混凝土组合梁优化方案既能提高顶板纵梁的承载能力,又能有效改善结构的抗裂性,对于地铁结构的抗渗性设计意义重大。

参考文献:

- [1] 雷崇. 地铁双层岛式地下车站结构布置与经济性研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(12): 109-114.
- [2] 奚程磊. 隐柱式大中庭轨交地下车站结构方案研究[J]. 地下工程与隧道, 2014(2): 7-11, 60.
- [3] 赵星. 不同柱跨下地铁无梁车站的内力影响研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(S2): 1228-1234.
- [4] 温银龙. 地铁场站上翻梁结构设计优化研究: 以福州地铁 2 号线某场站为例[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- [5] 黄文金, 林本清, 魏梦伟, 等. 邻近地铁车站道路路面病害的调查与评价: 以福州地铁 1 号线为例[J]. 福建工程学院学报, 2020, 18(1): 29-34.
- [6] 李延, 漆泰岳, 雷波, 等. 地铁车站结构设计中空间效应的影响[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(5): 138-144.
- [7] 王博. 明挖地铁车站整体建模结构受力分析[J]. 铁道标准设计, 2012, 56(11): 75-78, 88.
- [8] PEZESHK S, CAMP C V, CHEN D. Design of nonlinear framed structures using genetic optimization[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(3): 382-388.
- [9] ZOU X K, CHAN C M, LI G, et al. Multiobjective optimization for performance-based design of reinforced concrete frames [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(10): 1462-1474.
- [10] 杨海. 地铁车站纵梁内力研究[J]. 隧道建设, 2013, 33(9): 746-750.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [13] 中国国家标准化管理委员会. 焊接 H 型钢: GB/T 33814-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 型钢混凝土结构施工钢筋排布规则与构造详图: 12SG904-1[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [15] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 钢筋混凝土结构技术规程: YB 9082-2006[S]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范(2015 版): GB 50010-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 组合结构设计规范: JGJ 138-2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

(责任编辑: 方素华)