

建筑结构 优秀设计图集

8

《建筑结构优秀设计图集》编委会

中国建筑工业出版社

建筑结构优秀设计图集

8

《建筑结构优秀设计图集》编委会



中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构优秀设计图集 8/《建筑结构优秀设计图集》

编委会. —北京: 中国建筑工业出版社, 2008

ISBN 978-7-112-10470-3

I. 建… II. 建… III. 建筑结构-结构设计-中国-图集 IV. TU318-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 174794 号

本书系全国第五届优秀建筑结构设计评选出的大跨、空间、工业及特种建筑结构部分 30 个获奖项目汇编而成, 是我国 2001~2005 年期间大跨、空间、工业及特种建筑结构的代表作。每个项目均介绍工程概况、计算方法、地基基础、结构布置和构造大样等, 以图为主, 辅以少量文字说明, 具有较强的技术性、实用性和资料性, 对建筑结构设计及施工人员、土建类大专院校师生有较大参考价值。

责任编辑: 蒋协炳

责任设计: 郑秋菊

责任校对: 安 东 陈晶晶

建筑结构优秀设计图集

8

《建筑结构优秀设计图集》编委会

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京天成排版公司制版

北京蓝海印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 24½ 插页: 9 字数: 590 千字

2009 年 3 月第一版 2009 年 3 月第一次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 70.00 元

ISBN 978-7-112-10470-3

(17394)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

《建筑结构优秀设计图集》编委会

主任：徐培福

副主任：柯长华 吴德安 徐建

委员：(以姓氏笔画为序)

吴德安 柯长华 徐建

徐培福 黄宝清 蒋协炳

蓝天 樊小卿

序 言

随着国家经济持续快速发展,我国已成为世界建筑业最活跃、繁荣的地区之一,建筑的建造速度和规模属世界之前列,涌现了一批优秀建筑,丰富了建筑形式和结构体系。这些优秀建筑是建筑师、结构工程师及机电设备等工程师通力合作的结晶。结构工程师为新颖的建筑形式和现代化的建筑功能的实现提供了重要的技术支撑,对保证建筑工程的质量、安全和经济起着重要作用。

为促进我国建筑工程健康、快速发展,提高结构设计技术水平,鼓励结构工程师的积极性和创造性,中国建筑学会十分赞成建筑结构分会开展全国优秀建筑结构的评选。2007年我会又继续承办了第五届全国优秀建筑结构设计评选,建设部质量安全司也积极支持此项评选,为支持单位。全国优秀建筑结构设计奖为国内建筑结构设计最高荣誉奖。当前,这一奖项的评选已受到全国各设计单位和结构设计人员的欢迎和积极支持,在行业中享有很好的声誉。

第五届优秀建筑结构设计评选范围是2001~2005年期间建成的建筑工程的建筑结构设计。此次活动得到了各省、市、自治区建筑学会、各设计单位的热烈响应,申报项目共137项。为做好评审工作,组织了由30名全国著名的结构专家组成评审委员会;公开发布评奖的条件:1.在建筑结构设计中有所创新,对提高建筑结构设计水平有指导意义;2.在建筑结构设计中解决了难度较大的结构问题,对提高建筑结构设计水平有指导作用;3.在建筑结构设计中适应建筑功能要求,对提高工程质量和施工速度有显著作用,取得显著的经济效益。评审委员认真负责地审阅申报材料,评审会上进行讨论评议,最后采用无记名投票方式产生了一等奖12个、二等奖22个、三等奖48个;评选结果于2007年10月16日~11月16日在中国建筑学会网站上公示,听取意见;最后于2008年6月由中国建筑学会在中国建设报、建筑学报、建筑结构学报、建筑结构刊物上正式发布获奖项目名单。并在中国建筑学会建筑结构分会年会上向获奖者颁发奖状和证书。

为进一步表彰获奖的优秀建筑结构工程,并满足广大读者的需要,每届优秀建筑结构设计评选后,我们都精选部分获奖项目汇编成图集。在第一届和第二届评选后,汇编成第1册和第2册图集;第三届评选后汇编成第3和第4两册图集;第四届评选后汇编成第5和第6两册图集。本届评选后,在82项获奖项目中我们精选了72项汇编成两册。其中第7册收集了优秀多、高层建筑结构设计,第8册收集了优秀大跨度空间结构及特种结构设计。由于各获奖设计单位的大力支持、编委会成员的努力,本书能在较短的时间内正式出版。

本图册的内容包括各工程的工程概况、计算方法、结构布置、构造大样、配筋做法、抗震构造措施,部分工程还介绍了试验研究主要结果。对于结构设计人员,有较好的参考价值。

在参考这些工程的经验时, 请注意从 2001~2002 年我国一批主要的结构设计标准规范已完成了修订并正式发布实施, 本书中有一部分工程是按修订前的标准规范设计的, 修订后的新规范适当提高了安全度, 对结构规则性、地震作用、荷载组合、抗震措施以及对复杂结构的特殊要求等都增加了新的内容。本书收集的部分工程设计难免有个别内容与新标准规范有不符之处, 望请读者注意和谅解。此外, 也请读者在参考这些工程经验时, 注意实际工程所处的地震地面运动强弱和地基情况不同, 设计中选定的抗震性能目标不同, 风作用、气候温度变化、建筑使用功能不同等情况, 针对具体情况作具体分析是必要的, 尤其是超限高层建筑结构的设计, 更要注意分析具体情况。

言中

· 附录 附录 A 附录 B 附录 C 附录 D 附录 E 附录 F 附录 G 附录 H 附录 I 附录 J 附录 K 附录 L 附录 M 附录 N 附录 O 附录 P 附录 Q 附录 R 附录 S 附录 T 附录 U 附录 V 附录 W 附录 X 附录 Y 附录 Z 附录 AA 附录 AB 附录 AC 附录 AD 附录 AE 附录 AF 附录 AG 附录 AH 附录 AI 附录 AJ 附录 AK 附录 AL 附录 AM 附录 AN 附录 AO 附录 AP 附录 AQ 附录 AR 附录 AS 附录 AT 附录 AU 附录 AV 附录 AW 附录 AX 附录 AY 附录 AZ 附录 BA 附录 BB 附录 BC 附录 BD 附录 BE 附录 BF 附录 BG 附录 BH 附录 BI 附录 BJ 附录 BK 附录 BL 附录 BM 附录 BN 附录 BO 附录 BP 附录 BQ 附录 BR 附录 BS 附录 BT 附录 BU 附录 BV 附录 BW 附录 BX 附录 BY 附录 BZ 附录 CA 附录 CB 附录 CC 附录 CD 附录 CE 附录 CF 附录 CG 附录 CH 附录 CI 附录 CJ 附录 CK 附录 CL 附录 CM 附录 CN 附录 CO 附录 CP 附录 CQ 附录 CR 附录 CS 附录 CT 附录 CU 附录 CV 附录 CW 附录 CX 附录 CY 附录 CZ 附录 DA 附录 DB 附录 DC 附录 DD 附录 DE 附录 DF 附录 DG 附录 DH 附录 DI 附录 DJ 附录 DK 附录 DL 附录 DM 附录 DN 附录 DO 附录 DP 附录 DQ 附录 DR 附录 DS 附录 DT 附录 DU 附录 DV 附录 DW 附录 DX 附录 DY 附录 DZ 附录 EA 附录 EB 附录 EC 附录 ED 附录 EE 附录 EF 附录 EG 附录 EH 附录 EI 附录 EJ 附录 EK 附录 EL 附录 EM 附录 EN 附录 EO 附录 EP 附录 EQ 附录 ER 附录 ES 附录 ET 附录 EU 附录 EV 附录 EW 附录 EX 附录 EY 附录 EZ 附录 FA 附录 FB 附录 FC 附录 FD 附录 FE 附录 FF 附录 FG 附录 FH 附录 FI 附录 FJ 附录 FK 附录 FL 附录 FM 附录 FN 附录 FO 附录 FP 附录 FQ 附录 FR 附录 FS 附录 FT 附录 FU 附录 FV 附录 FW 附录 FX 附录 FY 附录 FZ 附录 GA 附录 GB 附录 GC 附录 GD 附录 GE 附录 GF 附录 GG 附录 GH 附录 GI 附录 GJ 附录 GK 附录 GL 附录 GM 附录 GN 附录 GO 附录 GP 附录 GQ 附录 GR 附录 GS 附录 GT 附录 GU 附录 GV 附录 GW 附录 GX 附录 GY 附录 GZ 附录 HA 附录 HB 附录 HC 附录 HD 附录 HE 附录 HF 附录 HG 附录 HH 附录 HI 附录 HJ 附录 HK 附录 HL 附录 HM 附录 HN 附录 HO 附录 HP 附录 HQ 附录 HR 附录 HS 附录 HT 附录 HU 附录 HV 附录 HW 附录 HX 附录 HY 附录 HZ 附录 IA 附录 IB 附录 IC 附录 ID 附录 IE 附录 IF 附录 IG 附录 IH 附录 II 附录 IJ 附录 IK 附录 IL 附录 IM 附录 IN 附录 IO 附录 IP 附录 IQ 附录 IR 附录 IS 附录 IT 附录 IU 附录 IV 附录 IW 附录 IX 附录 IY 附录 IZ 附录 JA 附录 JB 附录 JC 附录 JD 附录 JE 附录 JF 附录 JG 附录 JH 附录 JI 附录 JJ 附录 JK 附录 JL 附录 JM 附录 JN 附录 JO 附录 JP 附录 JQ 附录 JR 附录 JS 附录 JT 附录 JU 附录 JV 附录 JW 附录 JX 附录 JY 附录 JZ 附录 KA 附录 KB 附录 KC 附录 KD 附录 KE 附录 KF 附录 KG 附录 KH 附录 KI 附录 KJ 附录 KK 附录 KL 附录 KM 附录 KN 附录 KO 附录 KP 附录 KQ 附录 KR 附录 KS 附录 KT 附录 KU 附录 KV 附录 KW 附录 KX 附录 KY 附录 KZ 附录 LA 附录 LB 附录 LC 附录 LD 附录 LE 附录 LF 附录 LG 附录 LH 附录 LI 附录 LJ 附录 LK 附录 LL 附录 LM 附录 LN 附录 LO 附录 LP 附录 LQ 附录 LR 附录 LS 附录 LT 附录 LU 附录 LV 附录 LW 附录 LX 附录 LY 附录 LZ 附录 MA 附录 MB 附录 MC 附录 MD 附录 ME 附录 MF 附录 MG 附录 MH 附录 MI 附录 MJ 附录 MK 附录 ML 附录 MM 附录 MN 附录 MO 附录 MP 附录 MQ 附录 MR 附录 MS 附录 MT 附录 MU 附录 MV 附录 MW 附录 MX 附录 MY 附录 MZ 附录 NA 附录 NB 附录 NC 附录 ND 附录 NE 附录 NF 附录 NG 附录 NH 附录 NI 附录 NJ 附录 NK 附录 NL 附录 NM 附录 NN 附录 NO 附录 NP 附录 NQ 附录 NR 附录 NS 附录 NT 附录 NU 附录 NV 附录 NW 附录 NX 附录 NY 附录 NZ 附录 OA 附录 OB 附录 OC 附录 OD 附录 OE 附录 OF 附录 OG 附录 OH 附录 OI 附录 OJ 附录 OK 附录 OL 附录 OM 附录 ON 附录 OO 附录 OP 附录 OQ 附录 OR 附录 OS 附录 OT 附录 OU 附录 OV 附录 OW 附录 OX 附录 OY 附录 OZ 附录 PA 附录 PB 附录 PC 附录 PD 附录 PE 附录 PF 附录 PG 附录 PH 附录 PI 附录 PJ 附录 PK 附录 PL 附录 PM 附录 PN 附录 PO 附录 PP 附录 PQ 附录 PR 附录 PS 附录 PT 附录 PU 附录 PV 附录 PW 附录 PX 附录 PY 附录 PZ 附录 QA 附录 QB 附录 QC 附录 QD 附录 QE 附录 QF 附录 QG 附录 QH 附录 QI 附录 QJ 附录 QK 附录 QL 附录 QM 附录 QN 附录 QO 附录 QP 附录 QQ 附录 QR 附录 QS 附录 QT 附录 QU 附录 QV 附录 QW 附录 QX 附录 QY 附录 QZ 附录 RA 附录 RB 附录 RC 附录 RD 附录 RE 附录 RF 附录 RG 附录 RH 附录 RI 附录 RJ 附录 RK 附录 RL 附录 RM 附录 RN 附录 RO 附录 RP 附录 RQ 附录 RR 附录 RS 附录 RT 附录 RU 附录 RV 附录 RW 附录 RX 附录 RY 附录 RZ 附录 SA 附录 SB 附录 SC 附录 SD 附录 SE 附录 SF 附录 SG 附录 SH 附录 SI 附录 SJ 附录 SK 附录 SL 附录 SM 附录 SN 附录 SO 附录 SP 附录 SQ 附录 SR 附录 SS 附录 ST 附录 SU 附录 SV 附录 SW 附录 SX 附录 SY 附录 SZ 附录 TA 附录 TB 附录 TC 附录 TD 附录 TE 附录 TF 附录 TG 附录 TH 附录 TI 附录 TJ 附录 TK 附录 TL 附录 TM 附录 TN 附录 TO 附录 TP 附录 TQ 附录 TR 附录 TS 附录 TT 附录 TU 附录 TV 附录 TW 附录 TX 附录 TY 附录 TZ 附录 UA 附录 UB 附录 UC 附录 UD 附录 UE 附录 UF 附录 UG 附录 UH 附录 UI 附录 UJ 附录 UK 附录 UL 附录 UM 附录 UN 附录 UO 附录 UP 附录 UQ 附录 UR 附录 US 附录 UT 附录 UV 附录 UW 附录 UX 附录 UY 附录 UZ 附录 VA 附录 VB 附录 VC 附录 VD 附录 VE 附录 VF 附录 VG 附录 VH 附录 VI 附录 VJ 附录 VK 附录 VL 附录 VM 附录 VN 附录 VO 附录 VP 附录 VQ 附录 VR 附录 VS 附录 VT 附录 VU 附录 VV 附录 VW 附录 VX 附录 VY 附录 VZ 附录 WA 附录 WB 附录 WC 附录 WD 附录 WE 附录 WF 附录 WG 附录 WH 附录 WI 附录 WJ 附录 WK 附录 WL 附录 WM 附录 WN 附录 WO 附录 WP 附录 WQ 附录 WR 附录 WS 附录 WT 附录 WU 附录 WV 附录 WW 附录 WX 附录 WY 附录 WZ 附录 XA 附录 XB 附录 XC 附录 XD 附录 XE 附录 XF 附录 XG 附录 XH 附录 XI 附录 XJ 附录 XK 附录 XL 附录 XM 附录 XN 附录 XO 附录 XP 附录 XQ 附录 XR 附录 XS 附录 XT 附录 XU 附录 XV 附录 XW 附录 XX 附录 XY 附录 XZ 附录 YA 附录 YB 附录 YC 附录 YD 附录 YE 附录 YF 附录 YG 附录 YH 附录 YI 附录 YJ 附录 YK 附录 YL 附录 YM 附录 YN 附录 YO 附录 YP 附录 YQ 附录 YR 附录 YS 附录 YT 附录 YU 附录 YV 附录 YW 附录 YX 附录 YY 附录 YZ 附录 ZA 附录 ZB 附录 ZC 附录 ZD 附录 ZE 附录 ZF 附录 ZG 附录 ZH 附录 ZI 附录 ZJ 附录 ZK 附录 ZL 附录 ZM 附录 ZN 附录 ZO 附录 ZP 附录 ZQ 附录 ZR 附录 ZS 附录 ZT 附录 ZU 附录 ZV 附录 ZW 附录 ZX 附录 ZY 附录 ZZ

徐志福

2008 年 8 月

目 录

序言

• 大跨及空间建筑结构 •

上海铁路南站主站屋结构设计	3
新疆体育中心体育场结构设计	17
重庆市袁家岗体育中心体育场结构设计	31
上海旗忠国际网球中心结构设计	44
杭州大剧院结构设计	54
上海东方艺术中心结构设计	68
复旦大学正大体育馆结构设计	85
广州地铁二号线江南西站结构设计	95
首都博物馆新馆大跨度结构设计	113
绵阳九洲体育馆结构设计	135
玉兰大剧院结构设计	147
中国济源篮球城体育馆结构设计	157
长江防洪模型大厅结构设计	169
浙江财经学院下沙校区体育中心结构设计	184
黄龙体育中心网球馆开合结构	194
中国浦东干部学院钢结构设计	211
苏州国际博览中心结构设计	220
中国电影博物馆结构设计	233
北京市高级人民法院审判业务用房结构设计	246
联想融科资讯中心 C 座结构设计	256

• 工业建筑结构与特种建筑结构 •

浙江华联三鑫石化有限公司年产 60 万吨 PTA 项目结构设计	269
恩德(东营)风电设备叶片生产车间工程设计	281
南山观音圣像结构设计	289
珠海摩天宇(MTU)航空发动机维修有限公司 1 号厂房结构设计	297
中关村地下综合管廊及空间开发工程结构设计	304
天津人才科技大厦基坑支护工程	316

上海地铁一号线上海南站改建工程结构设计	328
北京某光学仪器厂高精密车床基础防微振设计	344
沈阳世博园百合塔结构设计	355
中国第二重型机械集团公司重型容器车间结构设计	370

大跨及空间建筑结构

设计时间 2004

工程竣工日期 2006

设计单位 华东建筑设计研究院

[200002] 上海市汉口路 151 号

法国 AREP 建筑公司

主要设计人 周建龙 汪大绥 李 时 邹 瑾 邢文磊

本文执笔 周建龙 李 时

[illegible]

主站屋总面积约为 4.2 万 m^2 ，其中 -6.000m/-7.000m 标高为到达层，设有旅客出

[illegible]

为钢屋盖结构体系。因屋面钢结构柱网与下部混凝土结构不一致,故在 9.900m 平台上设置环形转换大梁,用以支撑上部钢屋盖传来的柱子荷重。主站屋结构示意图见图 6。

1. 基础设计

场地处于古河道分布区,地层变化较为复杂,场区中层⑥暗绿色硬土层及层⑧粉质粘土层缺失,层⑤灰色粘土层厚度大且土性变化较大,层⑦粉砂层埋藏较深且标高变化较大,根据场地土层分布特点,主站屋部分的基础形式采用了独立承台加桩基(无地下室)或筏板加桩基(有地下室)的基础形式。鉴于主站屋 9.8m 标高广厅区范围为大跨度结构,对结构的不均匀沉降相对较为敏感,且该范围内还有近 20 根柱子落在地铁的顶板之上,而地铁的沉降比一般房屋建筑更为严格,为协调地铁结构与站屋结构的变形一致,必须控制主站屋的整体沉降量,实际控制站屋的总沉降量小于 3cm。为达到这一目标,我们选择层⑦2 为桩基持力层,且桩端进入层⑦2 不少于 $3d$,考虑到站屋基础与地铁基础紧邻,故桩型选择钻孔灌注桩,桩径采用 $\phi 750$ 。由于场地区域持力层土层起伏较大,故将广厅区范围划为四个区域,选用不同的桩长,桩长为 42~60m 不等,承载力设计值约为 3800~4300kN。尽管桩基的计算沉降量能够满足设计的要求,但由于场区砂性土层较厚,且受到施工工艺的限制,施工中钻孔灌注桩桩底沉渣难以达到设计要求,最初的试桩报告的结果也反映出沉渣过厚的现象,为此,采用了桩端后注浆的施工工艺,以减少桩基的沉降。每根桩基注浆量约为 1.5~2.0t,后期的试桩结果及结构完成后的沉降监测表明,后注浆对减少沉降效果明显。7.5m 标高候车厅基础采用钻孔灌注桩,桩径采用 $\phi 650$,桩长为 50m,承载力设计值约为 3000kN,同样也采用了桩端后注浆的施工工艺。

2. 下部预应力混凝土结构

由于工程铁路、地铁及轻轨纵横交叉,屋面又是个覆盖多根线路的圆形平面,支撑钢屋盖的上部钢柱子呈环向等距布置,而下部柱子必须沿轨道方向布置,上下柱网无法完全对齐,因此只能在标高 9.8m 平台上设置混凝土转换大梁,用以支撑上部钢屋盖传来的柱子荷重。转换大梁及周边环梁均采用有粘结预应力宽扁梁,为增加转换梁的刚度,转换梁的截面采用工字型,外圈工字型转换梁尺寸为 $2500(b_f)\text{mm} \times 2100(h)\text{mm} \times 1200(b)\text{mm} \times 500(h_f)\text{mm}$,内圈工字型转换梁尺寸为 $3000(b_f)\text{mm} \times 1650(h)\text{mm} \times 1950(b)\text{mm} \times 500(h_f)\text{mm}$ (见图 7)。外周环向车道因悬挑长度达 7.5m,也采用了有粘结预应力结构,预应力梁的混凝土强度等级为 C40。环状的广厅结构长度为 480~817m,受建筑功能的限制,该部分无法设置永久的伸缩缝,且上部钢结构支承在广厅结构的预应力大梁之上,如果设置永久的伸缩缝,则会对上部钢结构产生不利的影响,为此采用了不设缝的方案,并在设计中采取了以下措施:

(1) 留设 12 条施工后浇带并控制相邻板块的施工间隔时间,以减少混凝土的早期收缩。在混凝土配合比及外加剂的选择及养护措施上提出更为严格的要求。

(2) 在设计中,考虑了 $\pm 20^\circ\text{C}$ 温度作用的影响。将温度作用效应与其余荷载效应进行组合,在承载力验算时,其分项系数取为 1.1;正常使用验算时,分项系数取为 1.0;组合系数取为 0.7。考虑到混凝土的徐变特性,在框架设计中对温度作用引起的内力乘以 0.4 的折减系数。计算结果表明,温度变化会在环梁的平面内及平面外产生附加弯矩,此

外还会在梁中产生附加轴力,温度升高对预应力环梁抗裂有利,温度降低对预应力抗裂不利,而温度变化在柱中产生的附加弯矩影响较大。

(3) 对分块施工及后浇带封闭时梁中有效预应力进行计算,并对环向预应力梁的施工顺序对相邻预应力梁的有效应力的影响进行分析,确定了从中部向两侧施工的张拉顺序。

(4) 采用现场测试的摩阻力系数进行设计。由于环向空间抛物线线型没有相应的摩阻系数可供参考,工程在正式张拉前对6束预应力筋进行了张拉测试,并反演了摩擦系数,假定 $\kappa=0.0015$ 时,根据预应力筋应力测试结果,反演计算得出摩阻系数 $\mu=0.28$,并按此参数进行了设计。裂缝宽度按照0.1mm进行控制。通过适当降低预应力度,增加非预应力筋,来改善预应力结构的抗震性能。

(5) 考虑到温度作用和混凝土收缩的影响及环梁受力的特点,设计对预应力环梁的腰筋进行了加强。

(6) 对于个别负弯矩特别大的支座,通过增配无粘结预应力筋来改善支座的抗裂性能。

(7) 柱子采用内置钢管混凝土,以增加结构的延性并减小站台上柱子的尺寸(见图8)。站屋结构的柱子为 $\phi 1000$,内部放置 $\phi 550 \times 20$ 的钢管,柱子混凝土强度等级为C60。

(8) 合理选择下部结构的刚度,在满足结构侧移的条件下,尽量减小框架的刚度,以减少温度作用对柱端弯矩的影响。

3. 屋盖钢结构

屋盖钢结构平面为圆形,外形中部呈扁圆锥形,周边悬挑部分略为上翘,整个屋面结构由径向布置的18根Y形大梁支撑,大梁在外端分叉成复合的Y形,支撑在内外两圈柱子之上,大梁最内端相互支撑在顶压环上,从而形成带中心内压环的空间刚架结构体系(见图9、10)。内压环、内柱环、外柱环、悬挑外边缘的直径分别为26、150、226及275m。主梁、钢柱、中心内压环的钢材等级为Q345C,其余为Q345B,用于普通檩条中的钢棒为Q235级,其余用于柱顶、主梁下部内压环及加强檩条、屋面平面内的钢棒为Q345级。

屋面体系各构件组成如下:

(1) 柱子:柱子支撑在标高9.9m平台的转换大梁上,内柱共有18根,为变截面钢管柱,直径为600~1000mm;外柱共有36根,钢管直径为700mm。外环柱顶设置了四根由柱顶至混凝土转换梁的外柱斜索,提供屋面结构的主要抗侧刚度,并且将风荷载和地震作用产生的水平力直接传到下部混凝土转换梁,减小了柱底的弯矩(见图14)。

(2) 主梁:主梁为两次分叉的Y形结构,截面形式为变截面的橄榄形,在内环柱以内部分增加了两根钢棒组成的下弦杆,该形式不仅增加了主梁的刚度,而且可防止在不对称荷载作用下内压环的摆动。主梁为橄榄形截面,每隔1.8m设置T形内加劲肋(见图11)。

(3) 梁柱节点:主梁支撑在柱顶Y形的钢铸件支座之上,沿主梁侧向的支座形式为铰支座。为减小温度变化引起的主梁轴向变形对柱子产生强大的推力,将外柱与主梁的连接节点做成弹性铰支座,允许主梁沿径向有一定的位移(见图12、15、16)。

(4) 屋顶中心内压环:主梁的顶端支撑在中心内压环上,中心内压环为三角形桁架,

用于承受主梁传来的压力。

(5) 环向檩条: 环向檩条支撑于主梁之上, 平面形状为弧形, 承受环向拉力的能力较差, 故在环向设置了四圈抗拉钢棒, 形成了四道环箍, 称为加强檩条, 不仅大大增加了屋盖的整体刚度, 而且有利于减小主梁对柱顶的侧推力(见图 13)。

(6) 索体系: 索体系主要起稳定、提高体系抗侧刚度及抗扭刚度的作用, 包括环索、主索及外柱斜索。除了与加强檩条连接的环索外, 在主梁上挑端部还有两圈环索, 用以有效地减小悬挑梁段的挠度。主索呈交叉对称布置, 将内、外柱及主梁有效地结合起来, 大大提高了屋盖的整体抗扭能力(见图 13)。

三、钢屋盖专项计算分析及试验研究

1. 钢屋盖整体稳定性分析研究

整体稳定研究包括两个部分: 屋盖体系的整体稳定研究和单根主梁的整体稳定研究。

屋盖体系的整体稳定性研究的主要目标是体系总体的稳定性, 研究中考虑了初始缺陷($L/300$)及几何非线性。结构的一阶线性稳定系数为 4.722, 对应屈曲形式为顶压环呈现马鞍状的翘曲失稳(见图 17)。考虑初始缺陷的结构的几何非线性稳定系数为 4.0, 对应屈曲形式为相似的翘曲失稳, 表现为主梁产生非对称的过大的挠度而不适宜继续承载。计算结果表明, 该屋盖钢结构的线性稳定系数与带缺陷结构的几何非线性稳定系数相差很小(相差 0.722), 说明该屋盖结构对缺陷不敏感。同时, 该屋盖结构的主要荷载为恒荷载, 其他荷载对屋盖结构的整体稳定性影响很小, 因而, 4.0 的非线性整体稳定系数完全满足该结构的整体稳定性要求。

单根主梁的整体稳定性研究的主要目标是主梁的应力分布、整体稳定性及主梁内部构件的局部稳定性, 研究中考虑了双非线性(几何及材料非线性)的影响。根据计算结果(见图 18、19、20), 主梁的弹塑性整体稳定系数为 2.905, 考虑到主梁所承受的荷载中, 恒载占相当大的比例, 我们认为主梁的整体稳定性满足设计要求。可以看到, 失稳时, 主梁只在分叉处附近达到塑性。

2. 屋盖钢结构的抗震性能研究

抗震研究进行了多遇、中震以及罕遇地震下的时程分析。通过对不同地震作用提出不同的设计要求的方法来实现“小震不坏, 中震可修, 大震不倒”的抗震思想。由于主索及外柱斜索是主要的抗侧力构件, 设计中结合抗震研究对主索与外柱斜索的初应力进行了优化。优化的原则是: 调整索的初始应力, 保证所有的索在多遇地震下不退出工作; 在中震下, 所有的索不屈服, 可以有不超过 5% 的索应力降为 0 并退出工作; 在罕遇地震下, 应力达到屈服的索不超过 5%; 在满足以上要求的前提下, 初始应力应尽量低以便于施工。这主要是因为索无论是应力为 0 退出工作还是应力屈服(由于假设索为理想弹塑性材料, 故不会达到极限强度)导致破坏, 结构的抗侧刚度都将有明显降低。而另一方面, 由于 72 根索呈环状对称布置, 当少量的索退出工作或屈服时, 旁边的索将接替它的工作, 所以结构的安全度还是很大的。进行时程分析以研究索的应力变化, 保证优化目标的实现。为了研究下部混凝土结构对上部钢屋盖的影响, 我们也进行了包括下部结构的整体结构模型的

抗震计算,结果证明下部混凝土结构影响不大。

3. 屋盖温度作用影响分析及外柱顶弹性支座刚度的选择

对大跨结构而言,温度作用对结构受力有很大的影响。工程考虑了 $\pm 30^{\circ}\text{C}$ 的温度作用,并与其他荷载效应进行了组合。计算表明,由于温度变化导致主梁发生伸长,进而在柱顶产生较大的径向水平推力,使得柱顶侧移超出规范要求。随着柱刚度增加该水平推力将会进一步增大,并会产生更大的柱底弯矩,因此,靠增加柱刚度无法解决这一问题。为此,设计采用设置弹性支座来释放这一水平推力,将弹性支座设置在主梁与外柱顶的连接节点上。首先,需确定弹簧刚度 K 。弹簧刚度 K 必须与柱侧移刚度相对应,同时,由于在构造上弹簧与主梁连接轴需能容纳在铸钢件的空腔内,决定了弹簧的尺寸与最大变形量受到严格限制。我们与同济大学合作进行了“外柱柱顶合理弹簧刚度的确定”的研究工作,研究了弹簧刚度变化对柱顶侧移、弹簧最大变形量、主索应力等因素的影响,研究结果证明了取 $K=4.0\text{kN/mm}$ 对结构是最优的结果。

4. 铸钢节点应力计算及实验研究

外柱顶铸钢节点受力复杂,构造复杂,是设计中要特别关注的重要节点。为此,我们先做了实体有限元分析并进行局部优化,确认节点的应力分布,这是进行铸钢节点载荷试验及对铸钢件进行质量检验的依据(见图 21)。

随后,我们与同济大学合作进行了铸钢节点的足尺试件加载试验,以检验该节点在最大设计荷载作用下的安全性并用实验数据对比和验证有限元模型的适用性和计算结果的可靠性(见图 22)。试验最大加载值在设计荷载值的基础上放大 1.3 倍。试验结果证明有限元计算结果可靠,铸钢节点至少有 1.3 倍的安全余度。

5. 屋盖钢结构风致振动研究

委托同济大学土木工程防灾国家重点实验室做了几何缩尺比为 1:200 的刚性模型风洞测压试验。在风洞中模拟了大气边界层风场,模型上共布置了 760 个测点。为了考虑周边环境对结构的影响,分 24 个风向角进行试验(见图 23、24)。由于刚性风洞试验无法体现结构在脉动风荷载作用下的动响应,因此还必须用有限元的方法对结构的风致响应做进一步研究。根据动力学的原理,在有限元建模的基础上,加上从风洞试验得到的时程数据,对结构整体进行瞬态分析,得到结构各点位移响应时程,进而得出位移的风振系数 $\beta=1+\mu\sigma/\bar{U}$ (μ 为峰值因子,取为 3.5; σ 为位移响应的标准方差; $\bar{U}$ 为屋面平均风压引起的竖向静位移)。计算结果表明,每个点的风振系数都是不同的,这与荷载规范规定的整个建筑取单一的风振系数相比更具合理性,而且对同一测点,关注的响应不同,得出的风振系数也不相同,不同的风向角,得出的风振系数也不同,通常风洞试验报告给出的最大平均风压,此时风振系数的取值不能取最大值,而应取对应风向角下的风振系数,但风洞试验未考虑不同方向来风的概率分布的影响。表 1 为工程的重要响应的风振系数。对每种最不利位移取最大峰值响应对应的风荷载及阵风因子,采用阵风荷载因子法,得到对应的等效静风荷载,作为工程设计的风荷载标准值。对三种位移状况,分别对应一组等效静风荷载。因此,在荷载组合时,与风荷载相关的组合都必须分别带入三组等效静风荷载进行计算。

50 年重现期 10min 风速下的结构位移最大响应值及阵风因子 G

表 1

工况名称	最大响应位置	位移响应平均值 $\bar{R}(\text{mm})$	位移响应方差 $\sigma_R(\text{mm})$	位移响应峰值 $\hat{R}_{\text{Peak}}(\text{mm})$	阵风因子 G
90°风向角	迎风面悬臂端外缘向上变形(风吸)	394.5	102.3	752.4	1.91
150°风向角	背风面悬臂端外缘向下变形(风压)	-146.0	35.9	-271.8	1.86
120°风向角	外柱的水平位移(整体水平风力)	8.2	4.9	25.4	3.11

注:垂直铁路轨道指北向为 0°方向。

对每一组等效静风荷载,都是在屋面及外柱上 194 个点分别施加一个集中力,其作用效果与对应工况的阵风因子乘以风致响应的均值产生的作用效果相同。以风荷载为主的荷载工况为:

$$1) 1.0G + 1.4W_1 + 1.4 \times 0.7 \times T(-) + 1.4 \times 0.7 \times L;$$

$$2) 1.2G + 1.4W_2(W_3) + 1.4 \times 0.7 \times T(+) + 1.4 \times 0.7 \times L。$$

计算结果表明,对应最大向上风吸力的 W_1 并不大于屋面体系的自重,结构没有表现出向上的位移,工况 1 不是控制工况。对应最大向下风压力 W_2 的对顶压环的最大向下挠度影响不大,对悬臂段的最大向下挠度影响较大,但悬臂段刚度相对较大,挠度值满足要求。对应最大水平合力的 W_3 对钢屋盖影响不大,因为钢屋盖水平抗侧刚度较大。

6. 屋面预应力钢棒的施工计算

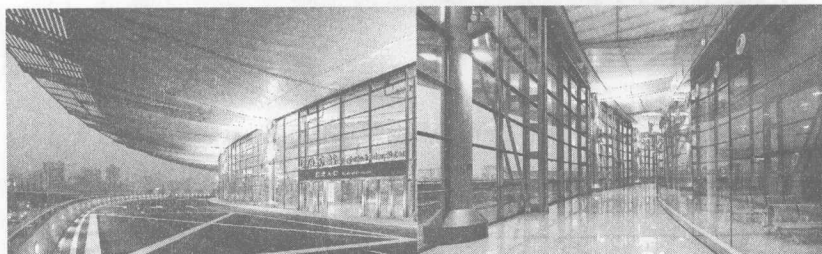
屋面抗扭钢棒连接相邻二次分岔的主梁,后张拉的钢棒对先张拉钢棒内力的影响较大,应依据已确定的抗扭钢棒张拉次序,计算出每根钢棒的张拉控制力。计算张拉控制力采用“拆杆法”,其原理为采用倒装反演计算方法计算各张拉工况需张拉钢棒的内力,从理想设计状态开始,按施工工况从后到前的顺序进行倒退分析,分析各工况理论锚固后的预应力钢棒轴力。最终确定的张拉次序为:依次张拉圈④、③、②和①(见图 25);每圈各榀钢棒沿逆时针方向依次张拉。18 榀主梁四圈钢棒加上设计目标共计 73 计算步,其中第一步是设计目标,第二步是拆除①圈第 18 榀主梁钢棒,第 73 步是拆除第四圈第 1 榀主梁钢棒。选择第 1, 5, 9, 13 和 18 榀主梁钢棒考察应力变化规律,作为制定张拉控制力和张拉方法的依据。实际张拉时在部分钢棒上安装了应力计进行检测,检测数据表明,实测和计算结果有很好的相符性。

四、钢屋盖施工过程介绍

钢屋盖采用超大跨旋转龙门吊吊装施工,龙门吊跨度 123m,上设两台 50t 起重小车,由于本工程钢构件最大单体重量 75.5t,因此可以满足 123m 半径范围内钢结构吊装。施工分为以下 7 个步骤(见图 26): 1. 安装中心临时支撑系统、中央塔吊、内外柱及旋转龙门吊; 2. 吊装主梁第一段 26m 长; 3. 吊装主梁第二段 44m 长; 4. 吊装主梁第三、四段 36m 长; 5. 吊装主梁第五、六段 17m 长; 6. 主梁吊装完成,檩条、拉索体系安装,拆除龙门吊; 7. 中心临时支撑体系拆除。其中,最后一步中心临时支撑体系拆除是整个结构体系由施工状态转换为设计受力状态的关键步骤,专门进行了卸载拆撑模拟验算,临时支撑分多步逐级卸载,并进行卸载过程的变形监控,与模拟验算结果相对比,确保卸载安全。最终最大卸载变形量实测值小于模拟计算值,反映结构刚度较大,满足设计要求。



图1 主站屋夜景照片



9.900m标高高架环道入口

广厅通道



广厅、候车厅全景



有天然采光的站台

跨踞地铁上的换乘敞厅

图2 主站屋内景照片