

文章编号:1006-2106(2008)06-0071-05

新广州站索拱结构性能研究*

陈强^{1**} 沈婷¹ 盛平² 甄伟²

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063; 2. 北京市建筑设计研究院, 北京 100045)

摘要:研究目的:新广州站房屋盖主要采用内凹式索拱结构形式,为全面了解和掌握索拱结构的受力性能及可能产生的5种影响,为施工图设计提供依据,特对此进行研究。

研究结论:索拱采用两端弹性支座,拉索至拱身的高度 $h=0.6H$,拱身截面取 $\phi 650 \times 25$ 时,索拱的受力综合性能较好;计算选取的2种索截面对索拱的受力影响不大;适当加大索的初始张力,有利于改善索拱结构在承受向上荷载的受力性能。总之索拱结构在向下的荷载作用下受力形式较为合理;但在向上的荷载作用下,拱身弯曲应力较大,支座水平反力增加,索拱变形也加大,拉索可能松弛。但可通过合理选择支座类型,适当加大初始张力予以控制。

关键词:站房;内凹式;索拱结构;受力性能;分析

中图分类号:TU375 **文献标识码:**A

Research on the Performance of Cable - Arch Structure of New Guangzhou Railway Station

CHEN Qiang¹, SHEN Ting¹, SHENG Ping², ZHEN Wei²

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd, Wuhan, Hubei 430063, China; 2. Beijing Institute of Architectural Design, Beijing 100045, China)

Abstract; Research purposes: The main structure form of the roof of New Guangzhou Railway Station is inner cable - arch structure, so the researches are done on it for the purposes of getting more knowledge about the stress performance of cable - arch structure to provide the basis for construction and design.

Research conclusions: If the support of cable - arch structure is elastic, the distance from the cable to the arch is equal to $0.6H$ and section of arch is $\phi 650 \times 25$, the cable - arch structure has a better comprehensive mechanical performance, and there is little influence on the mechanical property of cable - arch structure when choosing two different cables. Properly increasing the initial tension is beneficial to the mechanical property of cable - arch structure under upward loading. In a word, the mechanical property of cable - arch structure under downward loading is reasonable. But if the loading is upward, the bending stress of the arch becomes large and the horizontal reacting force on the support increases, resulting in the deformation of cable - arch becoming large and the cable relaxing. However, it can be controlled with more reasonable support type or increasing the initial tension.

Key words: station; inner cable - arch; cable - arch structure; mechanical property; analysis

新广州站建筑总量达到56万 m^2 ,车站纵向(南北向)长约448 m,横向(东西向)长约398 m。主站房地

下一层为设备层,埋深4.5 m左右;主站房地下正中还有地铁穿过,主站房与地铁完全脱开;地上共3层,地

* 收稿日期:2008-03-13

** 作者简介:陈强,1956年出生,男,高级工程师。

面层层高 12.0 m, 站台层层高 9.0 m, 高架层层高最大达到 29 m。

新广州站的屋盖结构主要由南北两侧无站台柱雨棚、主站房屋顶、中央采光带、东西主入口屋顶四部分组成。其中南北两侧无站台柱雨棚和主站房屋顶的主要结构形式为内凹式索拱, 单榀索拱跨度约 50 ~ 68 m。这种结构形式的屋盖, 目前国内已建成的建筑中尚未见到报道。为此, 有必要对其受力性能进行研究。

索拱结构的受力性能主要受索拱的高跨比、拱身的曲线形状、支座的抗推刚度、拉索至拱身的高度、拱

截面、索截面、索的初始张力等因素的影响。由于建筑方案已确定主站房和雨棚索拱的曲线形状为圆弧形, 索拱的高跨比为 1/8, 所以, 拱身的曲线形状、索拱的高跨比这 2 个因素可以不考虑。以下着重研究其他几个因素产生的影响。

1 结构模型及计算参数

计算模型中索拱拱身和撑杆分别采用的 Q345 级的无缝钢管, 直径为 $\phi 650 \times 35$ 及 $\phi 240 \times 12$ 。索为 1860 级的钢缆索, 直径为 $\phi 100$ 。计算模型如图 1 ~ 图 3 所示。

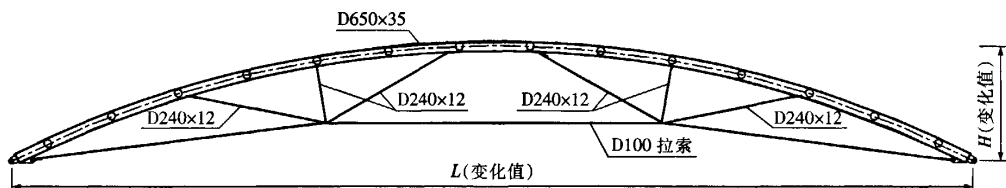


图 1 索拱桁架 TR1 立面图(单位:mm)

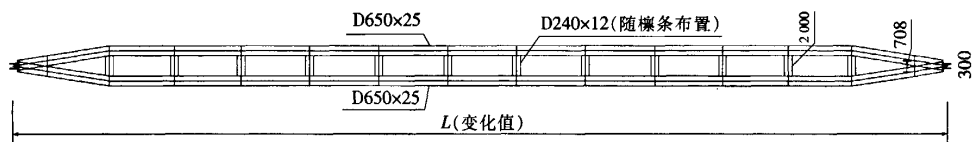


图 2 索拱桁架 TR1 平面图(单位:mm)

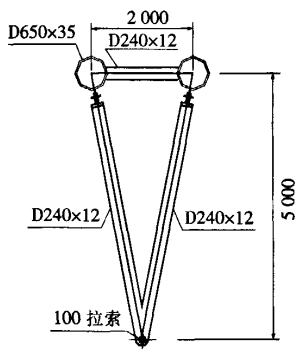


图 3 剖面图(单位:mm)

计算分析采用 ANSYS, 屋面恒荷载 1.1 kN/m^2 , 屋面活载 0.5 kN/m^2 , 基本风压 0.6 kN/m^2 , 温度变化: 室内 $\pm 15^\circ\text{C}$, 室外 $\pm 25^\circ\text{C}$ 。

具体分析的荷载组合工况主要为向下的荷载组合 ($1.2 \times \text{恒载} + 1.4 \times \text{活载}$) 和向上的荷载组合 ($0.9 \times \text{恒载} + 1.4 \times \text{全跨风载}$)——即负风压组合。

2 索拱结构的受力性能分析

索拱结构计算的初始状态为, 在自重和屋面恒荷

载作用下, 支座水平反力为零, 使支承结构只承受竖向荷载。

2.1 支座的抗推刚度的影响

分别取 4 种支座形式来判断拱脚的抗推刚度对索拱结构受力性能的影响。一是两端为铰支座, 支座水平刚度 ∞ ——即无水平位移; 二是一端为铰支座, 另一端为弹性支座, 弹性支座 k 值按支承索拱钢柱的侧移刚度来计算; 三是两端为弹性支座; 四是一端为铰支座, 另一端为滑动支座。计算结果如表 1 所示。

2.1.1 两端为铰支座时, 索拱在各种荷载作用下: 支座水平位移为零, 跨中竖向变形较小, 支座水平反力很大, 最大支座反力为 $2440 \times 2 = 4880 \text{ kN}$, 柱底弯曲应力很大难以承受。在向下的荷载组合和向上的荷载组合作用下, 拉索内力变化不大, 且在向上的荷载组合作用下, 拉索绷紧内力增加。

2.1.2 一端为铰支座, 另一端为弹性支座时, 索拱在各种荷载作用下: 弹性支座有较大的水平位移, 跨中竖向变形能够满足规范要求, 支座水平反力减小, 最大为 $797 \times 2 = 1594 \text{ kN}$, 柱底弯曲应力较大。在向下的荷载组合和向上的荷载组合作用下, 拉索内力变化

很大,且在向上的荷载组合作用下,拉索内力减小。

2.1.3 两端为弹性支座时,索拱在各种荷载作用下:两端支座均有水平位移,跨中竖向变形能够满足规范要求,支座水平反力进一步减小,最大为 $558 \times 2 = 1\,116\text{ kN}$,柱底弯曲应力减小,按计算柱截面能够满足要求。在向下的荷载组合和向上的荷载组合作用下,拉索内力变化很大,且在向上的荷载组合作用下,拉索内力进一步减小,但仍能保证受拉状态。

2.1.4 一端为铰支座,另一端为滑动支座时:支座水平位移和跨中竖向变形均很大,不能满足规范要求,支

座水平反力为零。在向下的荷载组合和向上的荷载组合作用下,拉索内力变化很大,且在向上的荷载组合作用下,拉索松弛结构失效。

通过对计算结果的分析可以得出,随着支座抗推刚度的减小,变化规律为:拱身内力(轴力和弯矩)及组合应力趋于增大,且组合应力中弯矩应力的比例逐渐增加,支座水平反力逐渐变小。在向下的荷载作用下,拉索内力趋向增大。在向上的荷载作用下,拉索内力趋于减小,支座水平位移和跨中位移均逐渐增大。索拱采用两端弹性支座时,索拱受力的综合性能较好。

表1 各支座形式下索拱受力比较

		1.2 恒载 + 1.4 活载				0.9 恒载 + 1.4 风载			
拱身内力	支座形式	最大轴力 /kN	最大弯矩 /(kN·m)	最大轴应力 /MPa		最大轴力 /kN	最大弯矩 /(kN·m)	最大轴应力 /MPa	
	一	-4 540	373.6	-47.7		-274	233	-3	
	二	-5 500	944	-57.7		1 140	1 500	12	
	三	-5 690	1 160	-59.7		1 360	1 720	14.3	
	四	-5 960	1 470	-62.6		2 100	5 230	22.1	
支座反力	支座形式	左端支座 F _x /kN	右端支座 F _x /kN	左端支座 F _y /kN	右端支座 F _y /kN	左端支座 F _x /kN	右端支座 F _x /kN	左端支座 F _y /kN	右端支座 F _y /kN
	一	1 648	-1 648	1 639	1 639	-2 440	2 440	-457	-457
	二	550	-550	1 635	1 635	-797	797	-448	-448
	三	333.2	-333.2	1 639	1 639	-558	558	-447	-447
	四	0	0	1 639	1 639	0	0	-438	-438
拉索内力	支座形式	左索内力 /kN	中索内力 /kN	右索内力 /kN		左索内力 /kN	中索内力 /kN	右索内力 /kN	
	一	2 324	2 669	2 324		2 488	2 755	2 488	
	二	3 658	4 420	3 658		631	265	631	
	三	3 925	4 772	3 925		363	78.5	363	
	四	4 325	5 291	4 325		0	0	0	
位移	支座形式	左端支座 水平位移 /mm	右端支座 水平位移 /mm	跨中竖向 位移/mm	竖向位移 /跨度	左端支座 水平位移 /mm	右端支座 水平位移 /mm	跨中竖向 位移/mm	竖向位移 /跨度
	一	0	0	-26	1/2 308	0	0	4.2	1/14 284
	二	0	106	-184	1/326	0	-153	215	1/279
	三	-36.5	36.5	-130	1/462	67.7	-67.7	187	1/321
	四	0	159	-264	1/227	0	-658	1 022	1/59

2.2 拉索至拱身高度的影响

计算模型中拱脚至拱顶的总高度为 H ,中部拉索至拱身的高度为 h ,分别取 $h = 0.4H$ 、 $h = 0.6H$ 、 $h = 0.8H$ 研究其初始状态和承受向下的荷载(1.2 恒载 + 1.4 活载)及向上的荷载(0.9 恒载 + 1.4 全跨风载)的受力性能。计算分析中取索拱支座为两端弹性支座。计算结果如表 2 所示。

2.2.1 随着 h 的增加,索拱的刚度相应增大。在支座水平反力为零的初始状态下,拉索的预张拉力逐渐减小,拱身的内力逐渐降低,趋向均匀。且拱身应力中弯矩所占的比例减少,轴力所占的比例增加。

2.2.2 在承受向下的荷载作用时,随着 h 的增加,索拱的各项性能指标趋好。刚度增加,支座反力、拱身和拉索内力减小。

2.2.3 在承受向上的荷载作用时,随着 h 的增加,索拱的刚度增加,支座反力、拱身内力减小。但拉索内力衰减较大,趋向松弛。

根据 3 种工况下索拱的计算分析得出:随着 h 的增加,索拱的刚度增加;支座反力、拱身和拉索内力减小。即索拱的 h 增大,对结构有利;但随着索拱 h 的增加,拉索的内力衰减较大,趋向松弛。即索拱的 h 不宜过大。因此取拉索至拱身的高度 $h = 0.6H$ 较为合理。

表 2 拉索至拱身高度变化时索拱受力比较

		1.2 恒载 +1.4 活载				0.9 恒载 +1.4 风载			
拱身内力	拉索至拱身高度	最大轴力/kN	最大弯矩/(kN·m)	最大轴应力/MPa		最大轴力/kN	最大弯矩/(kN·m)	最大轴应力/MPa	
	$h=0.4H$	-8 510	1 210	-89.3		1 290	2 440	13.6	
	$h=0.6H$	-5 690	1 160	-59.7		1 360	1 720	14.3	
	$h=0.8H$	-4 310	962	-45.2		1 200	1 510	12.6	
支座反力	拉索至拱身高度	左端支座 F_x /kN	右端支座 F_x /kN	左端支座 F_y /kN	右端支座 F_y /kN	左端支座 F_x /kN	右端支座 F_x /kN	左端支座 F_y /kN	右端支座 F_y /kN
	$h=0.4H$	565	-565	1 636	1 636	-781	781	-447	-447
	$h=0.6H$	333.2	-333.2	1 639	1 639	-558	558	-447	-447
	$h=0.8H$	222	-222	1 641	1 641	-519	519	-444	444
拉索内力	拉索至拱身高度	左索内力/kN	中索内力/kN	右索内力/kN		左索内力/kN	中索内力/kN	右索内力/kN	
	$h=0.4H$	5 016	6 578	5 016		1 364	659	1 364	
	$h=0.6H$	3 925	4 772	3 925		363	78.5	363	
	$h=0.8H$	3 273	3 745	3 273		76	0	76	
位移	拉索至拱身高度	左端支座 水平位移/mm	右端支座 水平位移/mm	跨中竖向 位移/mm	竖向位移/跨度	左端支座 水平位移/mm	右端支座 水平位移/mm	跨中竖向 位移/mm	竖向位移/跨度
	$h=0.4H$	-61.9	61.9	-228	1/263	101	-101	277	1/217
	$h=0.6H$	-36.5	36.5	-130	1/462	67.7	-67.7	187	1/321
	$h=0.8H$	-24.6	24.6	-86.4	1/694	40.6	-40.6	111	1/541

2.3 拱截面的影响

分别取拱身截面 $\phi 650 \times 25$ 和 $\phi 850 \times 30$, 研究其承受向下的荷载(1.2 恒载 +1.4 活载)及向上的荷载(0.9 恒载 +1.4 全跨风载)的受力性能。计算分析中取索拱 $h=0.6H$, 支座为两端弹性支座。计算结果如表 3 所示。

计算结果表明:拱身截面加大,在一定程度上增大

了索拱结构的刚度,使索拱的支座和跨中位移,拱身内力有所减小;在承受向下的荷载作用下拉索内力减小,在承受向上的荷载作用下拉索内力衰减幅度降低,索拱的受力性能有所改善。总体来看拱身截面加大,索拱的位移、拱身和拉索的内力变化并不大。但用钢量增加较多,使得造价增加,经综合比较拱身截面取 $\phi 650 \times 25$ 较为合理。

表 3 拱截面变化时索拱受力比较

		1.2 恒载 +1.4 活载				0.9 恒载 +1.4 风载			
拱身内力	拱截面	最大轴力/kN	最大弯矩/(kN·m)	最大轴应力/MPa		最大轴力/kN	最大弯矩/(kN·m)	最大轴应力/MPa	
	$\phi 650 \times 25$	-8 510	1 210	-89.3		1 290	2 440	13.6	
	$\phi 850 \times 30$	-5 690	1 160	-59.7		1 360	1 720	14.3	
支座反力	拱截面	左端支座 F_x /kN	右端支座 F_x /kN	左端支座 F_y /kN	右端支座 F_y /kN	左端支座 F_x /kN	右端支座 F_x /kN	左端支座 F_y /kN	右端支座 F_y /kN
	$\phi 650 \times 25$	565	-565	1 636	1 636	-781	781	-447	-447
	$\phi 850 \times 30$	333.2	-333.2	1 639	1 639	-558	558	-447	-447
拉索内力	拱截面	左索内力/kN	中索内力/kN	右索内力/kN		左索内力/kN	中索内力/kN	右索内力/kN	
	$\phi 650 \times 25$	5 016	6 578	5 016		1 364 659	1 364		
	$\phi 850 \times 30$	3 925	4 772	3 925		363	78.5	363	
位移	拱截面	左端支座 水平位移/mm	右端支座 水平位移/mm	跨中竖向 位移/mm	竖向位移/跨度	左端支座 水平位移/mm	右端支座 水平位移/mm	跨中竖向 位移/mm	竖向位移/跨度
	$\phi 650 \times 25$	-61.9	61.9	-228	1/263	101	-101	277	1/217
	$\phi 850 \times 30$	-36.5	36.5	-130	1/462	67.7	-67.7	187	1/321

2.4 索截面的影响

分别取拉索直径 $\phi 70\text{ mm}$ 和 $\phi 100\text{ mm}$, 研究其承受向下的荷载(1.2 恒载 + 1.4 活载)及向上的荷载(0.9 恒载 + 1.4 全跨风载)的受力性能。计算分析中取索拱 $h = 0.6H$, 支座为两端弹性支座。计算结果如表 4 所示。

计算结果表明:拉索截面加大,在承受向下的荷载时,拱身内力变化不大,组合应力中弯矩应力所占的比例减小,轴力应力所占的比例增加。拉索内力和应力均减小。索拱支座和跨中的位移明显降低。在承受向上的荷载时,拱身内力和位移变化不大。拉索内力减小。

表 4 索截面变化时索拱受力比较

	拉索直径	1.2 恒载 + 1.4 活载				0.9 恒载 + 1.4 风载			
		最大轴力 /kN	最大矩 / (kN · m)	最大轴力 应力/MPa	最大轴力 /kN	最大弯矩 / (kN · m)	最大轴力 应力/MPa		
拱身内力	70 mm	-4 960	975.7	-101		1 480	1 410	30.2	
	100 mm	-5 070	657	-103		1 470	1 070	29.9	
支座反力	拉索直径	左端支座 F_x/kN	右端支座 F_x/kN	左端支座 F_y/kN	右端支座 F_y/kN	左端支座 F_x/kN	右端支座 F_x/kN	左端支座 F_y/kN	右端支座 F_y/kN
	70 mm	553	-553	1 476	1 476	-824	824	-570	-570
	100 mm	355	-355	1 483	1 483	-776	776	-559	-559
拉索内力	拉索直径	左索内力 /kN	中索内力 /kN	右索内力 /kN		左索内力 /kN	中索内力 /kN	右索内力 /kN	
	70 mm	3 246	3 925	3 246		348	38	348	
	100 mm	1 785	2 104	1 785		30	0	30	
位移	拉索直径	左端支座 水平位移 /mm	右端支座 水平位移 /mm	跨中竖向 位移/mm	竖向位移 /跨度	左端支座 水平位移 /mm	右端支水 平位移/mm	跨中竖向 位移/mm	竖向位移 /跨度
	70 mm	-106	106	-363	1/165	158	-158	450	1/133
	100 mm	-68	68	-246	1/244	148	-148	467	1/128

2.5 索的初始张拉力的影响

分别取 10 种初始张拉力,由小逐渐加大,研究

拉索初始张拉力对结构的影响。计算结果如表 5 所示。

表 5 索的初始张拉力变化时索拱受力比较

索初始应变	跨中位移/mm	左索应力/MPa	中索应力/MPa	右索应力/MPa	拱最大轴力/kN	拱最大弯矩/(kN · m)
0.000 5	23.851	77	102	77	-1 120	-142.9
0.000 9	23.273	141	167	141	-1 240	-160.7
0.001 3	22.701	204	236	204	-1 360	-178.6
0.001 7	22.134	268	302	268	-1 490	-196.5
0.002 1	21.568	332	367	332	-1 610	-214.4
0.002 5	21.018	395	433	395	-1 740	-232.3
0.002 9	20.545	459	499	459	-1 870	-250.3
0.003 3	20.377	522	564	522	-2 000	-268.3
0.003 7	20.212	586	630	586	-2 130	-286.3
0.004 1	20.05	650	696	650	-2 260	-304.3

2.5.1 随初始张拉力的加大,跨中位移逐渐变小,初始应变从 0.000 5 到 0.004 1,提高到 8 倍,但挠度只减小 3.8 mm,约为 15.9%,所以大幅度加大初始预应力对跨中挠度的减小作用不大。

2.5.2 随着索初始张拉力的加大,索应力逐渐增大,且提高的较为迅速。初始应变从 0.000 5 到 0.004 1,提高到 8 倍,索应力也相应的提高到大约 8 倍,这对索储备应力抵抗其他荷载是不利的。

2.5.3 随着索初始张拉力的加大,拱最大轴力与最大弯矩也增大。但轴力与弯矩的变化较为平缓,当初始应变从 0.000 5 到 0.004 1,提高到 8 倍时,拱最大轴力与最大弯矩增大大约 2 倍。这说明索初始预应力的 大小对拱内力有一定的影响。

从以上分析可知,索初始张拉力的大小,对索应力影响最大,对跨中位移影响最小,对拱中内力影响居

(下转第 79 页)

房“精卫填海”的穹顶彩画吊顶南北呼应,形成天津站的一大特色。如图7、图8所示。



图7 南站房进站大厅室内效果图



图8 北站房二层大厅室内效果图

4 结论

面对新世纪的机遇和挑战,当代铁路旅客车站站

房建筑设计中所面临的最大问题,就是由传统客站模式向适应新时期、新要求的现代化铁路客站的巨大转变。天津站新建北站房工程经过不断的探索,逐渐符合新时期铁路客站的要求,具有以下几个特点:

(1) 体现交通建筑的特点并直接反映内部功能及空间组成,在和谐统一的前提下进行细部刻画,以达到整体的协调及与南站房完美统一;

(2) 利用建筑元素的细部刻画丰富车站的艺术效果,增加视觉的层次变化;

(3) 利用外檐装饰材料的多样选择及完美搭配避免车站的呆板感觉,打破单纯面的表象,以体现交通建筑的动感;

(4) 利用各种建筑空间的趣味变化增加建筑的内涵,提升车站对旅客的亲合力。

参考文献:

- [1] GB 50226—95,铁路旅客车站建筑设计规范[S].
- [2] GB 50091—2006,铁路车站及枢纽设计规范[S].
- [3] GB 50352—2005,民用建筑设计通则[S].
- [4] GB 50016—2006,建筑设计防火规范[S].

(编辑 张 滨)

(上接第75页)

中。适当加大索初始张拉力,有利于索拱结构在承受向上的荷载时,拉索仍能保证受拉,不会松弛使结构失效。

3 结论

通过对内凹式索拱研究计算,分析支座的抗推刚度、拉索至拱身的高度、拱截面、索截面、索的初始张拉力等因素对索拱的影响,初步了解了这种结构形式的受力性能,得出如下结论:

(1) 当索拱采用两端弹性支座,拉索至拱身的高度 $h=0.6H$,拱身截面取 $\phi 650 \times 25$ 时,索拱结构受力的综合性能较好。

(2) 计算中选取的2种索截面对索拱的受力影响不大。

(3) 适当加大索初始张拉力,有利于改善索拱结构在承受向上的荷载的受力性能。

总之在研究设定的条件下,索拱结构在向下的荷载作用下受力形式较为合理;但在向上的荷载作用下,拱身弯曲应力较大,支座水平反力增加,索拱变形也加大,拉索可能松弛。在设计时,必须充分考虑各种因素的影响,确定合适的索拱各构件的截面及支座类型,适当加大拉索的初始张拉力,以改善索拱结构在向上的荷载作用下的受力性能,避免拉索松弛。

参考文献:

- [1] 陆赐麟,等. 现代预应力钢结构[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [2] 沈世钊,等. 悬索结构设计[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [3] 黄明鑫. 大型张弦梁结构的设计与施工[M]. 济南:山东科学技术出版社,2005.

(编辑 梅志山)

作者: 陈强, 沈婷, 盛平, 甄伟, CHEN Qiang, SHEN Ting, SHENG Ping, ZHEN Wei
作者单位: 陈强, 沈婷, CHEN Qiang, SHEN Ting (中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉, 430063), 盛平, 甄伟, SHENG Ping, ZHEN Wei (北京市建筑设计研究院, 北京, 100045)
刊名: 铁道工程学报 ISTIC PKU
英文刊名: JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY
年, 卷(期): 2008 (6)
被引用次数: 2次

参考文献(3条)

1. 陆赐麟 现代预应力钢结构 2003
2. 沈世钊 悬索结构设计 2006
3. 黄明鑫 大型张弦梁结构的设计与施工 2005

本文读者也读过(10条)

1. 郭彦林, 胡淑辉. GUO Yan-lin. HU Shu-hui 一种新型预应力索-拱结构的弹性稳定性能研究[期刊论文]-空间结构 2005, 11 (3)
2. 剧锦三, 王芝芳, 郭彦林. Ju Jinsan. Wang Zhifang. Guo Yanlin 索在索-拱结构中的作用[期刊论文]-中国农业大学学报 2000, 5 (2)
3. 丁建国 索-拱结构受跨中集中力作用时的稳定性分析[期刊论文]-南京理工大学学报(自然科学版) 2003, 27 (2)
4. 沈婷, 陈强 新广州火车站结构初步设计介绍[会议论文]-2007
5. 朱奕锋, 曾滨, 李策 某多功能剧场索拱屋盖的设计与分析[会议论文]-2008
6. 蒋剑峰 平面预应力索拱结构的性能分析和优化设计[学位论文] 2003
7. 赵建 内凹式索-拱结构平面内极限承载力理论分析及试验研究[学位论文] 2008
8. 赵跃宇, 康厚军, 蒋丽忠, 王连华. ZHAO Yue-yu. KANG Hou-jun. JIANG Li-zhong. WANG Lian-hua 考虑双重非线性 的索-拱结构力学性能[期刊论文]-中南大学学报(自然科学版) 2007, 38 (1)
9. 王小文 新广州站咽喉区路基改桥梁技术方案研究[会议论文]-2007
10. 蔡德强 广州新客站桥梁关键节点局部应力分析[期刊论文]-中国水运(下半月) 2010, 10 (1)

引证文献(2条)

1. 黄利锋, 冯健, 赵建, 蔡建国, 盛平, 甄伟, 陈强, 沈婷 内凹式索拱结构极限承载力研究[期刊论文]-建筑结构学报 2010 (2)
2. 蔡建国, 王峰岚, 冯健, 张晋, 黄利锋, 盛平, 甄伟, 陈强 新广州站索拱结构屋盖体系连续倒塌分析[期刊论文]-建筑结构学报 2010 (7)

引用本文格式: 陈强, 沈婷, 盛平, 甄伟, CHEN Qiang, SHEN Ting, SHENG Ping, ZHEN Wei 新广州站索拱结构性能研究 [期刊论文]-铁道工程学报 2008 (6)