基于有限单元法大跨度拖车结构设计

金梁斌 张亮
（宜昌测试技术研究所 湖北 宜昌 443003）

摘要：以某水池拖车为研究对象，综合考虑拖车大跨度、小质量、高刚度要求，摒弃传统经验设计方法，采用有限单元法，基于拓扑优化求解力传递路径，逐步完成拖车结构设计，并结合工程实际进行尺寸优化，分析优化结果，寻找变化规律，解出最优值，旨在为相似平台优化设计提供参考指导。

关键词：拖车；拓扑优化；拱梁和主梁；端梁；尺寸优化

0 引言

我国是一个海洋大国，近年来，海洋维权领域矛盾重重，岛礁被占领、资源被掳夺、权益被侵犯，形式空前严峻，党的十八大作出了建设海洋强国的重大部署，海洋发展步入新的征程。拖曳水池作为水池领域的核心重要组成部分，为海洋设备研发提供理论试验支撑，节约成本、降低风险效果显著。据不完全统计，近几十年，世界各国相继建造的拖曳水池已超过百余座，经查阅，关于水池类的研究文献主要集中在测试试验，有不多的几篇文章简单介绍了拖曳水池方案设计的理念及方法，拖曳水池的主要构件——拖车，其结构设计鲜有文献提及。

在非标设备设计中，无严格标准可查，往往需凭借设计人员的经验或参照标准设备经过不断地尝试改进设计，最终使设计出的结构满足使用要求。传统拖车结构设计以经验设计为主，参考起重机设计，将复杂组成分解成经验公式可计算模型后，验算大概强度，取较高安全系数，以满足设计要求。本文所述拖车跨度大、质量小、刚度高，传统的经验设计较难满足要求，故采用有限单元法，基于拓扑优化合理分布材料，结合工程实际，进行拖车结构设计。

1 计算模型

1.1 设计要求

拖车总宽约 25m，长约 8m，总高不大于 4m，总重不大于 45t，中部位置承载为 3t。根据《起重机械设计制造新工艺与质量验收标准及操作维护实用手册》可知允许拖车跨中挠度

$$f \leqslant \frac{1}{2000} L$$

式中，L 为拖车跨度，则拖车允许挠度 f =12mm。

1.2 模型设计

拖车主要由端梁和主梁组成，端梁上布置驱动装置、刹车装置、导向测速装置等，主要承受垂直于轨道面方向的载荷。主梁是主要的工作测试平台，可根据需求设置轨道、横移小车及升降机构，可承受任意方向的载荷，大跨度承载结构，为满足刚度要求，减轻结构重量，多采用拱梁结构，如图 1 所示。

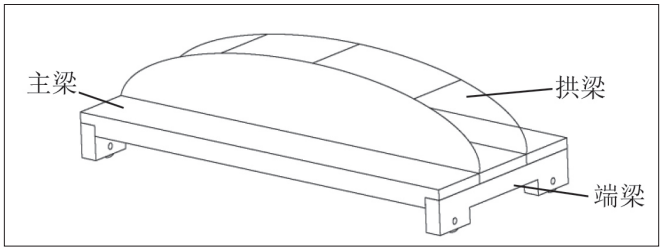


图 1 拖车

2 计算方法

拓扑优化是指在给定的设计空间内找到最佳的材料分布或者传力路径，从而得到在满足各种性能的条件下重量最轻的设计。本文以最小质量为目标函数，允许挠度 f 为边界条件，单元密度为设计变量，则优化数学模型可表述为：

$$\begin{cases} M_{\min} = M(x_1, x_2, \cdots, x_n) \\ U \leqslant f \\ 0 \leqslant x_i \leqslant V \qquad i = 1, \cdots, n \end{cases}$$

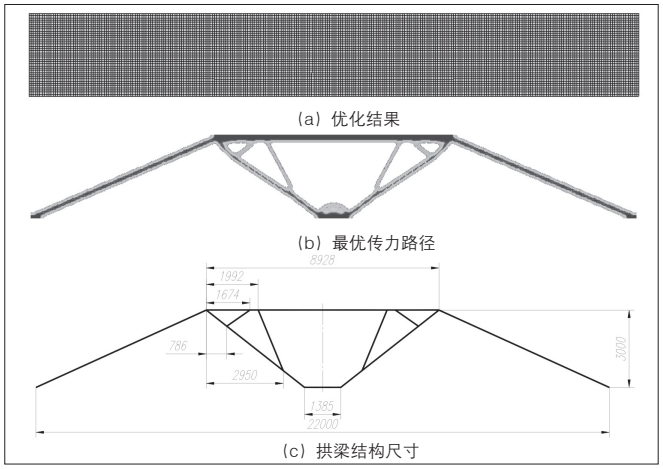
3 结果分析

3.1 拱梁

拱梁允许设计高度不大于 3m，宽度不大于 22m。根据设计空间建立拱梁优化模型，如图 2（a）所示，基于拓扑优化得到拱梁优化结果最优传力路径如图 2（b）所示，根据最优传力路径得到拱梁结构尺寸如图 2（c）所示。

3.2 主梁 + 拱梁

主梁允许设计高度不大于 0.8m，宽度 8m，长度 25m。基于拱梁优化结构，建立主梁优化模型，如图 3（a）



（a）优化结果
（b）最优传力路径
（c）拱梁结构尺寸

图 2　拱梁

所示，基于拓扑优化得到主梁 + 拱梁最优传力路径如图 3（b）所示，将主梁 + 拱梁模型化，如图 3（c）所示。

3.3　端梁

端梁允许设计高度不大于 0.8m，宽度不大于 0.5m，长度 8m。根据设计空间建立端梁计算模型，基于拓扑优化得到端梁优化结果如图 4（a）所示，最优传力路径如图 4（b）所示，根据最优传力路径得到端梁结构尺寸如图 4（c）所示。

方管较圆管有较好的加工装配性，较矩形管有较好的抗扭性，根据优化结果，建立最优传力路径拖车结构，如图 5 所示。采用 300mm × 10mm 和 200mm × 8mm 的方管建立拖车计算模型，总重 38.9t，施加附带重力场的边界条件，计算拖车力学特性，如图 6 所示。拖车最大

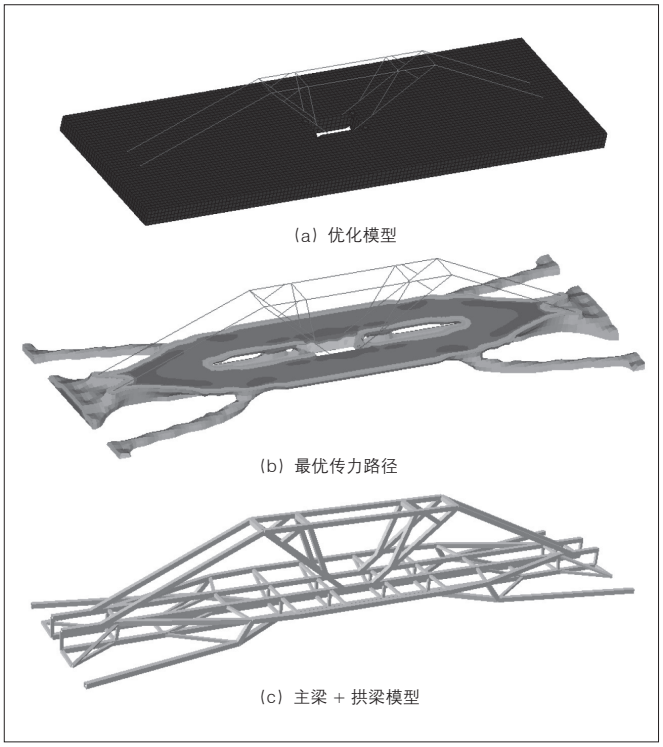
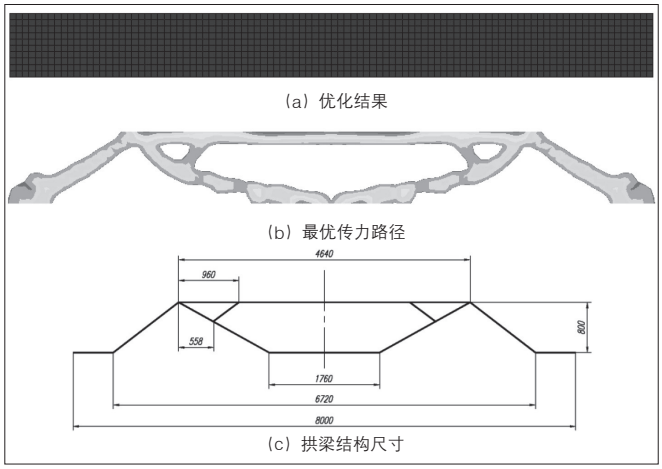

（a）优化模型
（b）最优传力路径
（c）主梁 + 拱梁模型

图 3　主梁 + 拱梁



（a）优化结果
（b）最优传力路径
（c）拱梁结构尺寸

图 4　端梁

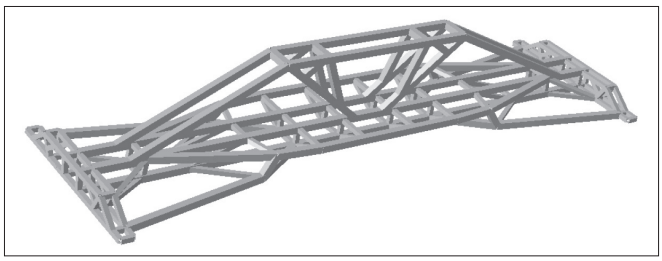


图 5　拖车结构

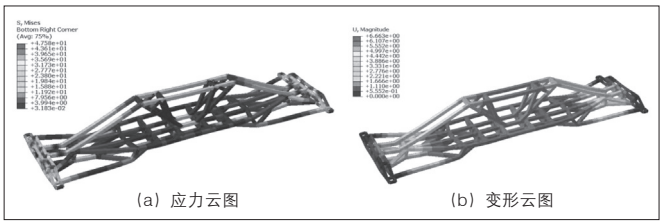

（a）应力云图
（b）变形云图

图 6　拖车

应力不大于 47.6MPa，发生在主梁和端梁连接处，主要由主梁弯曲变形引起，最大变形不大于 6.7mm，发生在拱梁和主梁连接的两跨处，主要由自重引起。

由计算分析可知，该结构并非拖车的最优结构，还可对方管型材进行尺寸优化，建立拖车尺寸优化工况，如表 1 所示。

根据优化工况，计算拖车应力、变形、重量，如表 2 所示。

结合表 1、表 2，由工况 3 ～ 5 可知，拖车应力、变形随端梁厚度减小显著增大，重量显著减小；由工况 6 ～ 12 可知，拖车应力、重量随主梁 + 拱梁型材尺寸减小显著减小，变形显著增大，拖车重量随主梁 + 拱梁型材厚度减小显著减小，应力、变形未发生明显变化；由工况 13 ～ 16 可知，拖车应力、变形随主梁 + 拱梁和端梁型材尺寸减小显著增大，重量变化较小。

将表 2 优化结果无量纲化，如图 7 所示。综合考虑应力、变形和质量，由图 7 可知，最优结果处于 10 ～ 12 工况，对比 3 个工况，11 工况为最优值，则拖车最

表 1　优化工况

工况	方管 /mm		工况	方管 /mm	
	主梁 + 拱梁	端梁		主梁 + 拱梁	端梁
1	300×10	200×8	9	250×5	200×5
2	300×8	200×8	10	220×6	200×5
3	300×6	200×8	11	220×5	200×5
4	300×6	200×6	12	200×5	200×5
5	300×6	200×5	13	190×5	190×5
6	280×6	200×5	14	180×5	180×5
7	280×5	200×5	15	170×5	170×5
8	250×6	200×5	16	160×5	160×5

表 2　优化结果

工况	应力 / MPa	变形 / mm	重量 /t	工况	应力 / MPa	变形 / mm	重量 /t
1	47.6	6.7	38.9	9	40.4	7.7	17.4
2	42.2	6.5	32.2	10	40.8	8.3	18.1
3	36.2	6.4	25.4	11	37.3	8.3	15.6
4	43.7	6.8	24.3	12	38.3	8.8	14.4
5	49.2	7.1	23.8	13	41.0	9.3	13.7
6	47.3	7.3	22.4	14	43.9	10.0	12.9
7	43.2	7.3	19.2	15	47.3	10.7	12.2
8	44.2	7.7	20.2	16	51.3	11.6	11.5

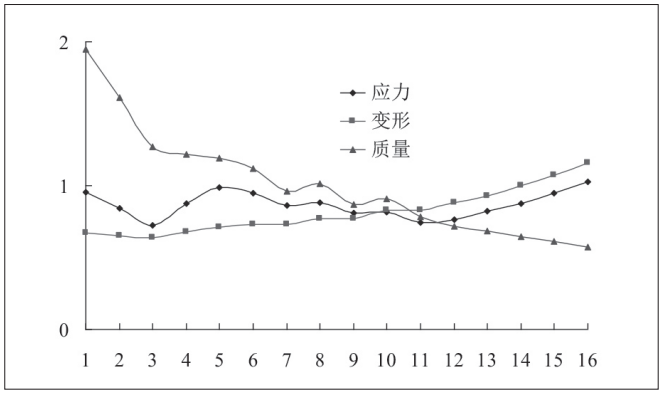


图 7　优化结果无量纲化

优结构为主梁 + 拱梁选材 220mm×5mm 方管，端梁选材 200mm×5mm 方管。

4　结语

本文以某水池拖车为研究对象，考虑拖车大跨度、小质量、高刚度等要求，摒弃传统的经验设计方法，采用有限单元法，基于拓扑优化合理分布材料，结合工程实际，进行尺寸优化，完成拖车结构设计，旨在为以后相似平台优化设计提供参考指导，主要得出结论如下：

（1）拖车采用 300mm×10mm 主梁 + 拱梁和 200mm×8mm 端梁的方管结构时，拱梁和主梁对称连接点两跨处的自重变形大于中部承载变形，可减轻主梁 + 拱梁重量。

（2）主梁 + 拱梁尺寸不变时，拖车应力、变形随端梁厚度减小显著增大，重量显著减小；端梁尺寸不变时，拖车应力、重量随主梁 + 拱梁型材尺寸减小显著减小，变形显著增大，拖车重量随主梁 + 拱梁型材厚度减小显著减小，应力、变形未发生明显变化；主梁 + 拱梁和端梁尺寸同步变化时，拖车应力、变形随主梁 + 拱梁和端梁型材尺寸减小显著增大，重量变化较小。

（3）经过拓扑优化和尺寸优化，拖车最优结构为主梁 + 拱梁选材 220mm×5mm 方管，端梁选材 200mm×5mm 方管。

参考文献：

[1] 马仁锋，倪欣欣，周国强．中国海洋科技研究动态与前瞻 [J]．世界科技研究与发展，2015,37(04):461-467.

[2] 杨国桢，王鹏举．中国传统海洋文明与海上丝绸之路的内涵 [J]．厦门大学学报（哲学社会科学版），2015(04):22-27.

[3] 贺鉴，宫高杰．“海上丝绸之路”战略下中国海洋权益的维护 [J]．湘潭大学学报（哲学社会科学版），2015,39(04):114-121.

[4] 李广年，谢永和，郭欣．拖曳水池方案设计 [J]．中国造船，2011,52(03):109-114.

[5] 陈玉龙，雷宇，张亮．拖曳水池拖车结构方案设计 [J]．机电工程，2015,32(12):1586-1589+1594.

[6] 张亮，刘大兴，陈玉龙．海洋探测仪耐压壳体结构强度特性研究 [J]．机械强度，2015,37(03):508-513.

作者简介：金梁斌（1985.05-），男，汉族，本科，高级工程师，主要研究方向：海洋工程装备。