

伦敦眼的建模及抗风振性能的改进

郑天心 季天健

机械, 航空及土木工程学院, 曼彻斯特大学, M60 1QD, 英国

提 要 英国航空伦敦眼 (The British Airways London Eye, 或称千禧轮 the Millennium Wheel) 是伦敦十大最受欢迎的观光景点之一。它每年吸引上百万游客去鸟瞰伦敦中心地区的繁华胜景。在 2007 年 4 月, 曼彻斯特大学对伦敦眼的三种状态进行了测量: 转动且无人, 静止且无人, 转动且满人。本文介绍了伦敦眼的有限元模型的建立; 比较了试验结果与计算结果; 进行了诸如辐索 (spoke cables) 和转动索 (rotation cable) 预拉力的参数分析, 增进了对该结构动力性能的理解; 提出了合理化 64 个沿轮周长分布的调频质量阻尼器 (TMD) 以改善其抗风振性能的方案。该研究将有益于同类观光轮结构的设计与建造。

关键词 伦敦眼, 抗风振, 预拉力, 索

一、简介与有限元模型

英国航空伦敦眼 (The British Airways London Eye, 或称千禧轮 the Millennium Wheel) 是伦敦十大最受欢迎的观光景点之一, 它每年吸引上百万游客去鸟瞰伦敦中心地区。如图 1 所示, 伦敦眼是一个直径 135 米, 重 1663 吨轴对称“自行车轮式”的巨型结构, 正常运行速度为每圈约 30 分钟。转动部分包括转轮外缘构架、观光舱、辐索、转动索和转轴毂盘, 共占总重的 55%。转轮外缘构架重 416 吨, 由九种不同截面尺寸钢管单元的构筑而成。32 个观光舱沿周长均匀分布在外缘构架的外弦上。它们可以因应所处的不同位置而调整, 使观光舱的地板始终保持水平。16 根转动索与构架外弦相连, 控制毂盘的起动与制动。构架和观光舱的重量则由 64 根与构架内弦相连的辐索传到中心的转轴毂盘上。与自行车的传力路径不同, 伦敦眼集中在转轮上的重量通过下部辐索受拉而传到毂盘和中心转轴上。辐索在传力中很关键, 所以它们的预张力对伦敦眼的安全与动力性能至关重要。从结构的侧立面图 (图 1b) 看出, 整个结构可以看作一个悬臂式结构, 长 25 米的中心转轴可以绕 58 米高的 A 形支撑的顶部转动, 而支撑脚则可以绕其底部的柱基转动。这两个转动趋势由两组后支索所约束, 而一组附加的稳定索用于微调, 确保转轴始终保持着水平的位置。作为世界上最高的观光轮之一, 结构在周期性风荷载作用下的振动是其动力性能设计的最重要的方面。因此, 64 个质量调频阻尼器 (TMD) 沿轮周长均匀安装在外缘构架的外弦上, 用以降低该观光轮因风荷载在水平方向 (如图 1a 的 Y 方向) 的振动。模型细节、质量汇总和动力性能与发表的相关文章^[1,2,3]相互对照, 保证了模型的精确。所有建模相关的参数以及设计图均由 JACOBS 提供。该研究的目的是: 深化对伦敦眼动力性能的理解; 比较伦敦眼的动力实验结果与计算机模拟结果; 衡量辐索和转动索预应力对结构动力性能的影响; 衡量 A 形支撑、后支索和约束塔对结构动力性能的影响; 提出一个有效且简单的减小结构风振反应的方法。本研究采用有限元建模及分析软件 ANSYS 来进行。模型忽略了转轴和毂盘的变形, 假设为壁厚 0.5 米, 长 25 米的刚性圆筒 (SHELL181)。并简化了观光舱的模型, 用四根无质量刚性杆单元 (LINK8) 和一个在重心位置的质点单元 (MASS21) 来模拟。因为这些附加的杆单元与外缘构架铰接, 观光舱不对结构体系贡献刚度, 也不考虑观光舱的转动惯量。质量调频阻尼器 (TMD) 由三个质点单元和两根杆单元来模拟。阻尼器中心的质点只在图 1a 的 Y 方向 (主要的风振方向) 上有有效质量, 而其他两个方向的质量则平均分配在阻尼器端点上, 从而避免了中心质点在弹簧单元横向上施加惯性力而产生位移。用来模拟拉索的单元考虑了双线性刚度矩阵, 可以模拟只有拉伸刚度的索的特性。当索的内力小于零时索松弛, 其刚度被设为零。拉索的预应力通过对索施加初始应变来实现, 其精确值由迭代法确定。最后, 外缘构架由相互刚接的有限变形梁单元 BEAM188 来模拟。

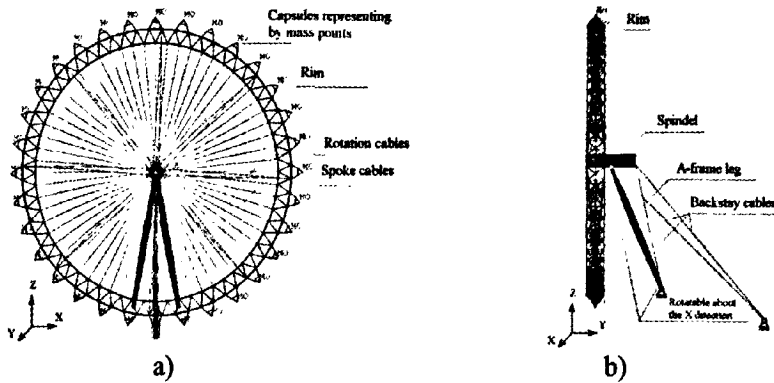


图 1: 伦敦眼的整体有限元模型

二、结构动力性能分析

(一) 辐索预拉力对结构动力性能的影响

因为伦敦眼是一个复杂的巨型结构,为了加深对其动力性能的了解,本研究将其建模分为三步来实现。模型 1:仅考虑转轮部分,忽略支撑体系和约束塔的影响,用以研究索力对结构动力特性的影响;模型 2:加入支撑体系,研究后支索和 A 形支撑的影响。模型 3:完整模型,加入了底部约束塔的作用。

模拟索预应力的方法包括对索施加初始拉应变,或者对索进行虚拟的降温,从而用温度应力来模拟预拉力。两种方法的最终效果一样,但问题是如何得到精确的辐索预拉力。因为每根辐索的设计预拉力高达 850kN [2],在如此大的径向拉力作用下,外缘构架不可避免地产生较大的变形。这种向内的变形会导致辐索的部分松弛而,从而引致了预应力的减少。因此如果索的初始变形仅由设计预拉力和拉索刚度来决定,模拟所得的索预拉力将远小于设计值。外缘构架的刚度不能够用理论办法简单而精确地决定,我们只能用迭代法去定索的初始应变。以设计预拉力除以拉索刚度所得的应变作为迭代法的第一步,发现实际的索拉力只有 593kN,比设计值 850kN 少 257kN。因此判断其初始应变(0.16%)产生了 593kN 的拉应力。在此基础上,在第二步增加 0.7%的初始应变到 0.23%来补足由于外缘构架变形而损失的 257kN,则索预拉力精确的达到了设计值。将上面的索初始应变施加在转轮模型上,并且考虑了重力作用,对该模型进行静力分析,然后将单元内力当作是特征值分析的初始应力状态,求出了各阶振型。首先,为了表达方便,令使辐索预拉力达到设计值的初始应变为 100%。假设初始应在 0%到 400%之间变化,选出了 16 个初始应变值作前八个振形的参考频率,同时还考虑了有重力和无重力两种状态。研究表明了在这八个振形的频率随辐索的预拉力而改变。根据频率与预拉力之间的关系,这些振形可以分成四组。第一组表现为转轮绕转轴振动(振型 1)。本研究假设辐索的端部固定在中心转轴上,而事实上辐索固定在毂盘上,且毂盘可以绕中心转轴自由转动。因此模式 1 不会出现在真实的结构中。但应该指出,因为该观光轮绕中心转轴转动是受约束塔控制的,而且即使在运行中其转动速度也是很慢的,约 30 分钟运行一周,所以它对真实结构的振动影响甚微。再者,振型 2 与振型 3 是绕径向的转动、振型 4 是沿转轴的平移、振型 5 到振型 8 是外缘构架的弯、扭,这些振型均与轮平面的转动无关。所以这样的简化不会对模拟结构的动力性能精确性有影响。

第二组表现为转轮平面绕 X 轴或 Z 轴的刚体转动(振型 2 和振型 3)。如图 2 所示,当不考虑重力作用,这两个振型的频率不随辐索的预拉力显著改变。索预拉力在 0kN (0%)到 3400kN (400%)范围内变化时,其频率只在 0.321Hz 到 0.325Hz 间变化。然而,当考虑了重力的作用并且初始拉应变少于 30%设计值,其频率随初应变值增加而显著增加。这是因为当预拉力为零时,观光轮的自重会使下部的辐索拉紧而上部的辐索松弛,因此在图 3 中发现位于 120 度以上的索拉力均为零。随着预拉力的增加,越来越多的索开始被拉紧,并且对这两个振型贡献刚度。当初拉应变达到设计值的 30%时,所有的拉索都被拉紧,振型频率达到最大值。在此之后,频率不再随拉应力的增加而改变,考虑和不考虑重力作用的频率-初应变曲线完全重合。表明决定该组中的振型的刚度的不是辐索拉力的大小,而是被拉紧的辐索的数量。另一方面,绕水平轴转动的振型 2 的刚度主要来自竖直方向的索,在振型 2 中(图 2a),竖直方向上(0 度和 180 度附近)的索变形最大;与之相反,振型 3(图 2b)中水平方向上的索有较大的变形。比较图 5 中两个振型的曲线可以发现,当考虑重力且辐索预拉力均为零的情况下,振型 3 的频率远高于振

型 2。这是因为如图 3 所示，此时水平方向上（120 度以下的）的辐索被拉紧，因此振型 3 一开始就有较大的刚度。相对地，只有一半的（0 度附近的）辐索被拉紧，所以振型 2 的刚度相对较低。

第三组表现为转轮外缘构架沿转轴方向刚体平移（振型 4）。该振型的频率随预拉力的增加而线性增加，重力也没有显著地影响其曲线的形状。这表明该振型的刚度主要由辐索的总拉力决定，而不是由被拉紧的辐索数量决定。第四组表现为外缘构架的弯曲和扭转。以振型 8 为代表，这些振型的频率随辐索预拉力的增加而减少。这是因为增加了的指向轴心的拉力会降低外缘构架的刚度，也可以认为在越大内拉力的作用下，构架就越容易产生与振型形状相似的失稳。在初拉应变达到设计值的 30%前，考虑了重力的振型频率略低于不考虑重力的振型频率。当所有辐索都被拉紧后，两条曲线重合。

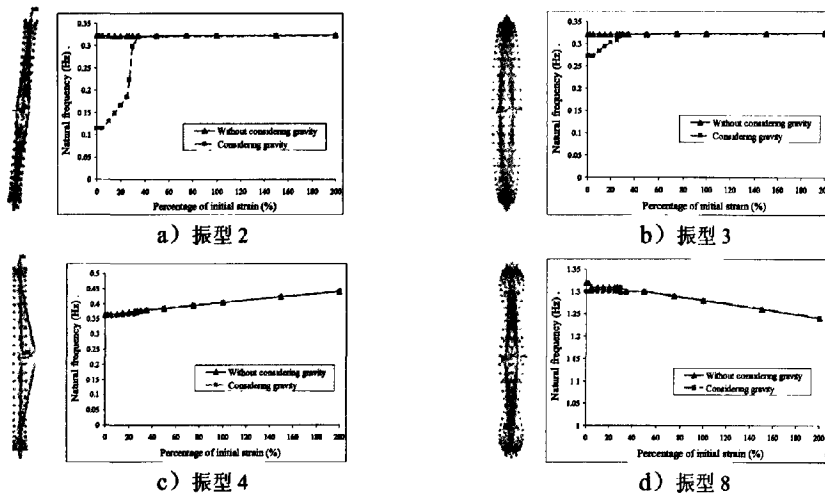


图 2: 振型 2、3、4、8 的频率与初始拉应变之间的关系

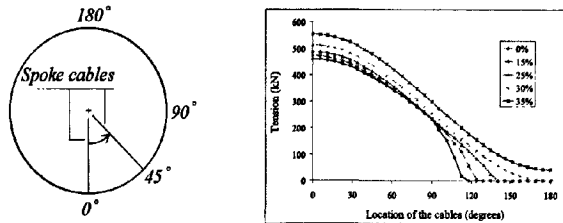


图 3: 考虑重力作用下辐索拉力与初始拉应变之间的关系

(二) 支撑结构、约束塔和质量调频阻尼器对结构动力性能的影响

模型 2 是在模型 1 的基础上添加了支撑结构，即考虑了中心转轴 (spindle)、A 形支撑 (A-frame leg) 和后支索 (backstay cable)。如表 1 所示，除了两个振形以外，模型 2 的其他振型及其自振频率均与模型 1 吻合。在模型 2 中增加了一个频率为 0.22Hz 的振型 II。从图 4 看出，该振型表现为后支索的拉压与整个观光轮的刚体转动。这个振型正是在设计手算过程中[2]所得的振型，频率也与手算频率 0.21Hz 相近。从而相互印证了手算和有限元模型的合理性。此外，支撑结构也使模型 1 中的振型 4 畸变成模型 2 中的振型 V。外缘构架的刚体沿转轴的刚体平移与支撑相反方向的运动相耦合，使得该振型的频率较模型 1 增加了 87%。这两个模型的频率在其他振型上最大的差距只有 3%。

表 1: 模型 1 和模型 2 各振型频率的比较

振型: 模型 1	1	-	2	3	4	5	6	7	8	9	10
频率 (Hz)	0.0300	-	0.3322	0.3350	0.4056	0.5099	0.4968	1.322	1.336	2.459	2.372
振型: 模型 2	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
频率 (Hz)	0.0299	0.2218	0.3217	0.3338	0.7571	0.5088	0.4968	1.322	1.366	2.461	2.372
比例	100%	-	97%	100%	187%	100%	100%	100%	102%	100%	100%

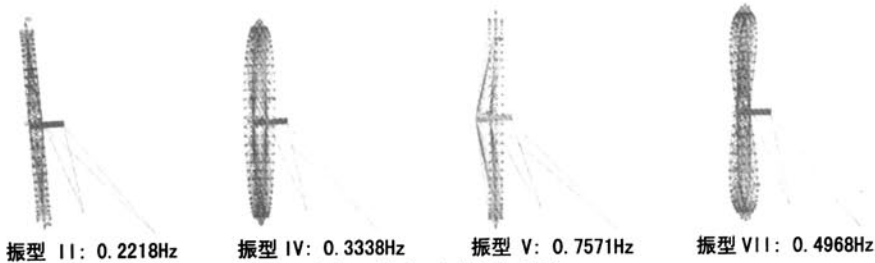


图 4: 模型 2 中的四个振型

位于底部的约束塔负责对观光轮的转动提供动力，也约束了外缘构架沿 Y 方向的运动。本研究忽略约束塔的变形，因此它对观光轮的作用被简化为对外缘构架底部 12 个结点 Y 方向上的约束，如图 5 所示。通过对比，发现模型 3 的各阶振型其实是模型 2 的振型的组合。例如，可以想象如果去除底部的约束塔，图 5 中的振型 C 中的转轮将会回弹成图 4 中的振型 IV；反之，假设有一个作用在底部的附加弯矩将外缘构架再扭转一个角度，则模型 3 中的振型 C 会变成模型 2 中的振型 VII。因此，振型 C 可以看作是振型 IV 和振型 VII 的中间状态，不只是在振型的形状上的中间状态，振型 C 的频率也恰恰处于这两个振型之间。表 2 给出了两组振型的相互关系，发现模型 3 中所有的振型均可以通过这种组合进行解析。

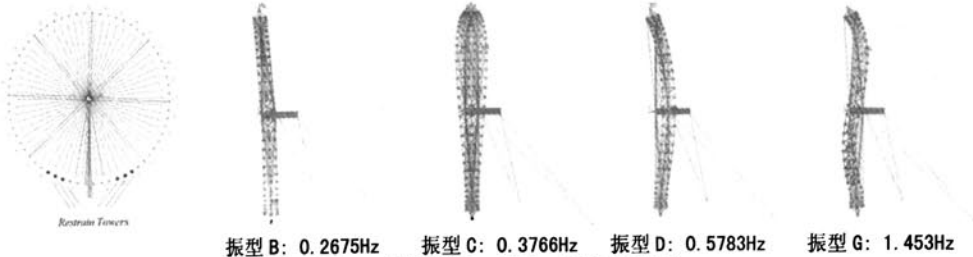


图 5: 约束塔的位置及模型 3 中的四个振型

表 2: 模型 2 和模型 3 各振型频率的比较

振型: 模型 2	II	III	VI	IV	VII	VI	VIII	V	VI	VIII	VII	IX	VIII	X	IX	XI
频率 (Hz)	0.22	0.32	0.51	0.33	0.50	0.51	1.3	0.76	0.5	1.3	0.50	1.3	1.3	2.5	1.3	2.4
振型: 模型 3	B		C		D		E			F		G		H		
频率 (Hz)	0.2675		0.3766		0.5783		0.7592			0.9882		1.453		2.048		

观察图 5 的振型可知，频率为 0.2675Hz 的振型 B 在沿 Y 方向的风荷载作用下最容易发生共振。因此，设计者在观光轮安装在外缘构架外弦的 64 个 TMD 来减少其振幅。每个 TMD 的有效质量为 500kg；为了达到最大的减振效果，阻尼器内的弹簧刚度通过调整，使 TMD 频率与振型 B 的频率相一致。本研究假设作用在伦敦眼上的周期性风荷载为倒三角形分布，并直接作用在外缘构架的结点上。在此模拟风荷载作用下，对结构进行简谐分析，图 6 的频率响应函数曲线表明 TMD 有效地减少结构在 0.2675Hz 的风振响应。犹如一般的质量调频阻尼器的作用一样，两个新的反应峰值出现在原反应峰值的两边。振型 B,1 的峰值出现在 0.245Hz 处，振幅为原峰值的 47%；振型 B,2 的峰值出现在 0.296Hz 处，振幅为原峰值的 55%；

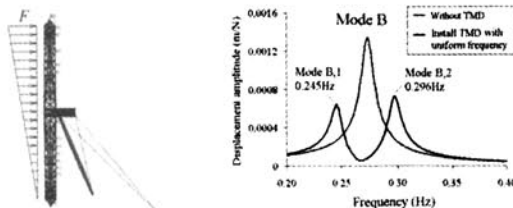


图 6: 模拟风荷载及观光轮顶部频率响应函数曲线 (FRF)

三、现场测量与计算结果比较

在 2007 年 4 月, 我们测量了伦敦眼第 11 号观光舱的加速度时程^[4]。在测量过程中, 观光舱内只有测量队的 4 名成员及测量设备, 从而避免了游客在舱内走动而可能对测量产生的干扰。三个量程为 $\pm 2g$ 的 A233 型加速度计固定在一个三个支脚立在舱内地板上的金属立方块上, 以测量三个垂直方向的加速度。金属块被放置在舱内座椅底下以防止被意外踢到。加速度信号传输通过 8 通道 CED16 位 power1401 高性能中介系统, 并由其顶部过滤装置所跟踪。一台安装了 CED 软件 Spike2 的笔记本电脑对数据进行了现场的采集、监测和处理。因为信号采集的频率要高于要测量的信号的 2 倍, 所以在本测量实验中的信号采集频率为每秒 100 个信号, 最高的辨析频率为 50Hz。测量过程中我们采集了足够多的数据。为了对加速度时程进行快速傅立叶转换, 每个文件中记录了 8192 个信号, 即记录了 81.92 秒的加速度时程。两个相连的数据文件间的时间差大约为 0.1 秒, 不足以影响数据精度。整个测量被分为四个阶段: 1, 只有第 11 号观光舱内有测量队, 其他 31 个观光舱中均空, 观光轮转动了半圈, 将 11 号观光舱送到了伦敦眼的顶部; 2, 此后, 观光轮因维护原因停转了约 14 分钟; 3, 观光轮在早上 10 点, 伦敦眼开始搭载乘客; 4, 观光轮连续地正常运转, 测量队所在的舱内不进入任何游客; 一个测量队成员在此时离开观光舱去记录其他观光舱中搭载乘客的数量。实验表明, 观光舱最大的加速度出现在 Y 方向。这说明有限元模型分析中判断观光轮振动主要发生在 Y 方向上是正确的; 而且将辐索和转动索直接连接在, 从而转轴上忽略转轮转动也是合理的。最大的加速度均方根 (RMS) 为 $0.12m/s^2$, 也是出现在 Y 方向上。观光舱内的沿三个方向的最大加速度均处于满足人体舒适度要求的加速度范围内, 因此自从伦敦眼在 2000 年建成后, 很少有游客抱怨结构振动过于剧烈而导致不适。但是, 因为测量当天泰晤士河上的风速很低, 所以该测量不能完全反映伦敦眼运行最差的状况。当观光轮停止转动时, 沿 Z, Y 和 X 方向的加速度分别为 $0.015 m/s^2$, $0.02 m/s^2$ 和 $0.005 m/s^2$ 。当结构静止时, 测量队感觉到一个因维护原因产生的很大的加速度。观光轮静止和运行时的加速度差异明显。然而, 在运行过程中观光轮有无搭载乘客对其加速度影响甚微。

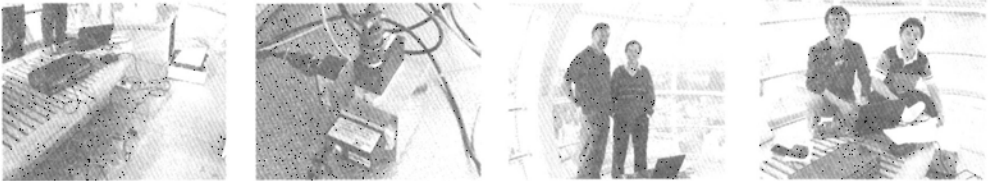


图7: 测量设备和测量队

将记录的加速度时程从时域转化到频域, 得到了 161 个加速度谱。归纳这些数据, 发现在 0.10Hz 到 0.25Hz 间有四个明显的共振频率分别与有限元模型的四个振型 (振型 B,1, 振型 B,2, 振型 G, 振型 H) 的频率相对应。在表 3 中, 振型 G 和振型 H 的频率与实验结果较好的吻合, 精度分别高达 94% 和 98%; 然而振型 B,1 和 B,2 的频率则比测量值高, 最大误差为 22%。然而, 有趣的是如果不考虑底部约束塔的作用, 则模型 3 的振型 B 还原成模型 2 的振型 II; 频率从 0.2675Hz 显著降低到 0.2218Hz, 恰好与测量结果相一致。事实上, 据现场观察, 底部约束塔因为观光轮在转动过程中伴随着沿 Y 向的振动, 所以外缘构架有规律地与约束塔上的转动装置时而接触, 时而分离。正是这种复杂的接触形式, 导致了在结构动力性能上的非线性。使得用线性模型的特征值分析结果不能全面地反映真实结构的动力性能。

表 3: 模型 2 和模型 3 各振型频率的比较

测量频率 (Hz)	0.200Hz (0.161Hz~0.220Hz)	0.242Hz (0.220Hz~0.335Hz)	1.55Hz (1.43Hz~1.68Hz)	2.10Hz (1.98Hz~2.25Hz)
振型: 模型 3	B, 1	B, 2	G	H
计算频率 (Hz)	0.245Hz	0.296	1.45	2.05
精度 (%)	122%	122%	94%	98%
振型: 模型 2	II, 1	II, 2	-	-
计算频率 (Hz)	0.203	0.245	-	-
精度 (%)	102%	102%	-	-

四、抗风振性能的改进方法

在大部分的高层建筑中, 质量调频阻尼器都安装在结构的顶部以达到最佳的减震效果, 所以图 6 是此种结构最通常的 TMD 减震反应谱。虽然 TMD 非常有效地减少了在原共振频率的振幅, 然而在原频率前后出现了两个新的共振峰值且其振幅约为原幅值的 50%。因为在这些高层建筑中往往只安装一个

TMD, 所以这样的设置是能达到的最优减震效果。在当前设计中, 伦敦眼上所有的 TMD 的自振频率均与振型 B 一致, 因此其减震效果与一般的高层建筑无异。周期性风荷载的频率在一个范围内随机分布, 所以可以认为在这种 TMD 布置方式下, TMD 的减震效率为 45% (100%-55%)。然而, 伦敦眼的情况其实与一般的高层建筑不一样, 一共有 64 个 TMD 对结构进行减震, 如果合理地重新调整 TMD 的设置, 则有可能进一步提高 TMD 的减振效率。观察图 6 发现 TMD 能够非常有效的减少结构在某个频率上的振幅, 但是在原峰值的前后产生新的峰值。此时, 如果将改变部分 TMD 的频率使之与新产生的反应峰值相吻合, 则这些峰值也会被有效的减少。基于这种思想, 具体的布置方式如图 8 所示: 首先, 将原来的 TMD 布置命名为第一步; 在第二步中 (图 8a), 后将 64 个阻尼器分成 3 组, 每组分别为 21 个, 22 个和 21 个; 保持弹簧刚度不变, 将第一组的质量从 500kg 减少到 403kg, 使其频率与第一个新产生的峰值的频率相同; 第二组保持不变, 与第二个峰值相应; 第三组增加到 591kg, 与第三个峰值相符; 将这 3 组 TMD 均匀地布置在外缘构架外弦上; 重复简谐分析 (harmonic analysis), 所得的新 FRF 图中出现了四个幅值大小相近的峰值, 而且其最大幅值为原来的 34%; 在第三步中 (图 8b), 前一步中的三个峰值加上这步中的四个峰值, 共有七个峰值要同时进行处理, 因此将 64 个 TMD 分成七组, 重复上面的调整有效质量的步骤, 使这 7 组阻尼器频率与其峰值相应。只需要通过三步的操作, 最大的峰值从原布置方式的 54% 减到了 25%。应该指出, 如果再进行下一步操作, 共有 15 个峰值要进行减振, 则每组中的 TMD 只有四个, 即在转轮平面上同一组的 TMD 相距约 90 度, 影响了 TMD 沿圆周均匀分布的原则; 再者, 图 8c 中 FRF 的峰谷差少于 20%, 说明已接近此方案的最优效果。相比原来 TMD 布置方法, 阻尼器的减振效果从 46% (单频) 增加到 75% (多频)。

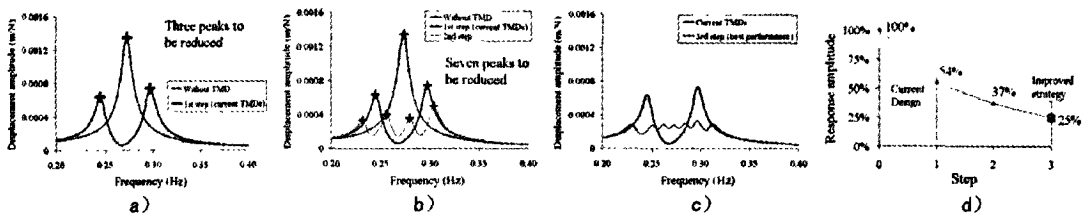


图 8: TMD 减振性能改进方法

五、结论

- 1, 有限元模型的计算结果与试验结果相符; 模态分析所的第一振型与设计时手算的振型吻合, 证明了手算的可靠性;
- 2, 根据辐索和转动索对结构刚度的影响, 结构振型可以分为三类; 考虑了重力的影响后, 如果辐索预拉力没有到达一定值, 上部的索会松弛并严重影响结构的刚度;
- 3, 本文提出了一种有效且简单的改进调频质量阻尼器效能的方案: 通过调节各组 TMD 的固有频率, 有效降低可能发生共振的各个频率的反应幅值。计算结果表明: 在模拟风荷载激励下, TMD 的减振效果从 46% (单频) 增加到 75% (多频)。

参考文献

- (1) Rattenbury, K. The Essential Eye. London: HarperCollins Publishers, 2002
- (2) Mann, A.P., N. Thompson and M. Smits, Building the British Airways London Eye. Proceedings of ICE, 2001, Vol.144: 60-72.
- (3) Berenbak, J., A. Lanser, and A.P. Mann, The British Airways London Eye. Part 2: structure. The Structural Engineer, 2001, Vol.79(2): 19-28.
- (4) Ji, T, X. Yu, T. Zheng and B.R. Eillis, Vibration measurement of the London Eye. Research Report, MACE. University of Manchester, 2007