

SAP2000 在美标门式刚架结构变形验算中的应用

筑信达 刘慧璇

摘要：门式刚架（门刚）结构是工业厂房中广泛应用的轻型钢结构形式。美标体系对门刚结构的变形控制有着明确而严格的规定，涵盖屋面梁挠度、结构侧向位移、轨距变形及吊车梁挠度四个方面。本文以某单跨门刚厂房为例，依据 MBMA 及 AIST-TR-NO.13，系统介绍在 SAP2000 中验算各项变形的操作流程及注意事项，为美标门刚结构变形校核提供参考。

关键词：门刚；美标；屋面梁挠度；结构侧移；轨距变形；吊车梁挠度

0. 引言

门式刚架（简称“门刚”）是轻型钢结构的主要结构形式之一，广泛应用于厂房、仓库等工业建筑。在美标设计体系下，门刚结构的变形验算涉及多项规范要求，包括屋面梁的挠度限值、结构整体侧移（位移角）限值、吊车梁的挠度及轨距变形限值等，各项限值的规范出处和计算方法各有差异。本文以某轻工厂房为例，结合 SAP2000，详细介绍美标体系下门刚结构各类变形验算的规范依据、限值取值和操作要点，供工程师参考。

1. 工程概况

本文以一单跨门式刚架厂房为例，如图 1 所示，厂房总跨度 18m（Y 向），总长 42m（X 向），屋面采用 0.6mm 单层压型钢板。考虑单台吊车，吊车梁处柱高 9.5m，配备一台 B 级桥式吊车，吊车梁跨度 6m。结构荷载按 ASCE 7-16 取值。

结构整体计算后，可通过【显示>表格】查看结构整体指标，包括用钢量、基底反力、结构周期等，如图 2 所示。

此外，根据规范要求，还需对以下几类变形进行验算：屋面梁挠度；结构侧移（位移角）；吊车梁轨距变形；吊车梁挠度。以下各节将分别介绍各项验算的规范依据与实现方法。

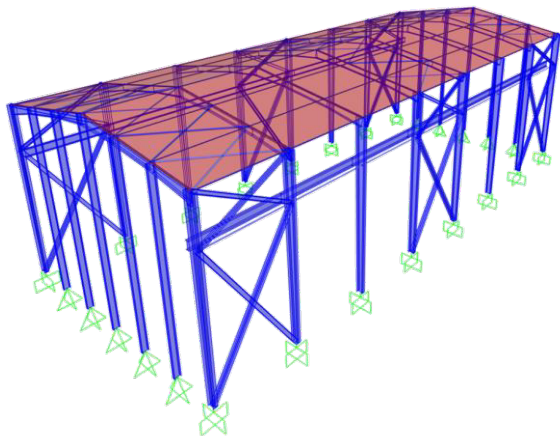


图 1 模型示意图

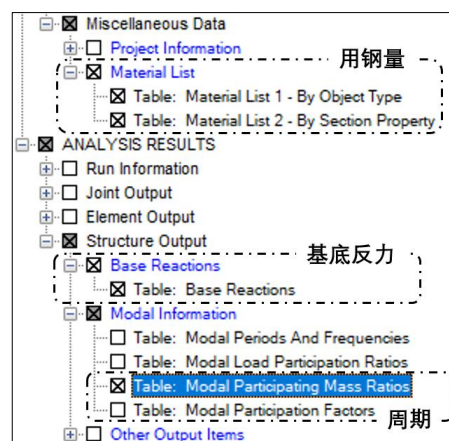


图 2 结构整体计算指标

2. 屋面梁挠度验算

《MBMA Metal Building Systems Manual》（简称 MBMA）2018 版^[1]表 1.3.1(b)中汇总了各构件的挠度限值，如图 3 所示。对于不支撑吊项的屋面梁，活荷载下的挠度限值为梁跨度的 1/180，恒载加活载下的挠度限值为梁跨度的 1/120。本案例中屋面梁跨度为 18m，活载 LL 挠度限值为 $18000/180 = 100\text{mm}$ ，恒载 DL+活载 LL 总挠度限值为 $18000/120 = 150\text{mm}$ 。

在 SAP2000 中，可通过【显示>变形图】查看屋面梁跨中竖向变形 U3，如图 4 所示。本例中，LL 下竖向变形为 29.8mm，DL+LL 下竖向变形约为 45mm，均满足限值要求。

Table 1.3.1(b): Deflection Limits^{a,b,c,h,i}
(Limits and footnotes are from IBC Table 1604.3)

Construction	Load		
	Live	Snow or Wind ^f	Dead + Live ^{d,g}
Roof Members ^c 屋面构件			
Supporting plaster ceiling 支撑石膏吊顶	L/360	L/360	L/240
Supporting non-plaster ceiling 支撑非石膏吊顶	L/240	L/240	L/180
Not supporting ceiling 不支撑吊顶	L/180	L/180	L/120
Supporting metal roofing ^a 支撑金属屋面	L/150	---	---
Structural Metal Roof and Siding Panels ^a	---	---	L/60
Floor Members	L/360	---	L/240
Exterior Walls and Interior Partitions			
With plaster or stucco finishes	---	L/360	---
With other brittle finishes	---	L/240	---
With flexible finishes	---	L/120	---
Wall Members Supporting Metal Siding ^a	---	L/90	---
Farm Buildings	---	---	L/180
Greenhouses	---	---	L/120

图 3 MBMA 挠度限值汇总表

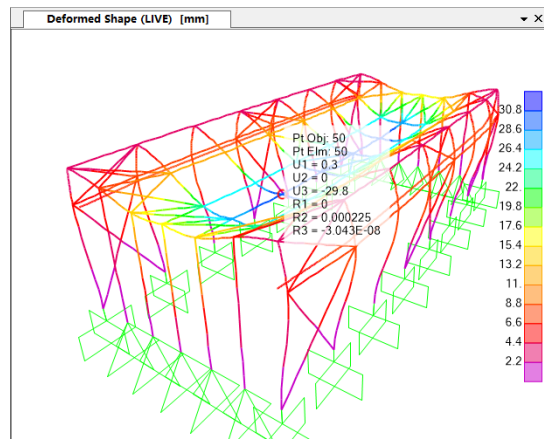


图 4 活载下屋面梁跨中最大变形

3. 结构侧移 (位移角) 验算

依据《AIST Technical Report No.13》(简称 AIST-TR-NO.13) 2021 版^[2]第 5.3 条 (图 5), 对于带有吊车的门刚结构, 应进行吊车侧向力荷载和风荷载下的吊车梁顶部侧移验算, 限值取柱高的 1/400 与 50.8mm (即 2 in) 的较小值。这一规定旨在控制吊车轨道的相对变形与绝对偏移, 保障吊车平稳运行。

In the calculation of localized crane loads on columns, the total transverse horizontal side thrust from the crane (see Section 3.7.2) shall be distributed between crane runway support columns based upon an overall analysis of the system, accounting for relative stiffness. Building frame lateral drift at the top of the crane girders shall be no greater than 1/400 of the height from column base or 2 in., whichever is less, for each of the following load conditions:

- (1) Crane lateral forces identified in this report.
- (2) Building wind loads due to a wind speed that has an annual probability of exceedance no greater than 10% (10-year recurrence interval).

图 5 AIST-TR-NO.13 结构侧移限值规定

本案例吊车梁顶柱高 $H = 9500\text{mm}$, 则: 侧移限值 $= \min(9500/400, 50.8) = \min(23.75, 50.8) \approx 24\text{mm}$ 。接下来分别介绍吊车荷载和风荷载下的侧移验算。

3.1 吊车荷载作用下的侧移验算

运行吊车侧向力荷载工况后, 查看吊车梁顶处的水平位移。如图 6 所示, 选中吊车梁顶部位置的节点, 通过【显示>表格>Analysis results>Joint output>Displacements】表格查看吊车梁顶所有节点的位移值, 默认 U1 为 X 向水平位移, U2 为 Y 向水平位移。本案例吊车荷载下吊车梁顶最大侧移约 8mm, 满足 24mm 限值要求。

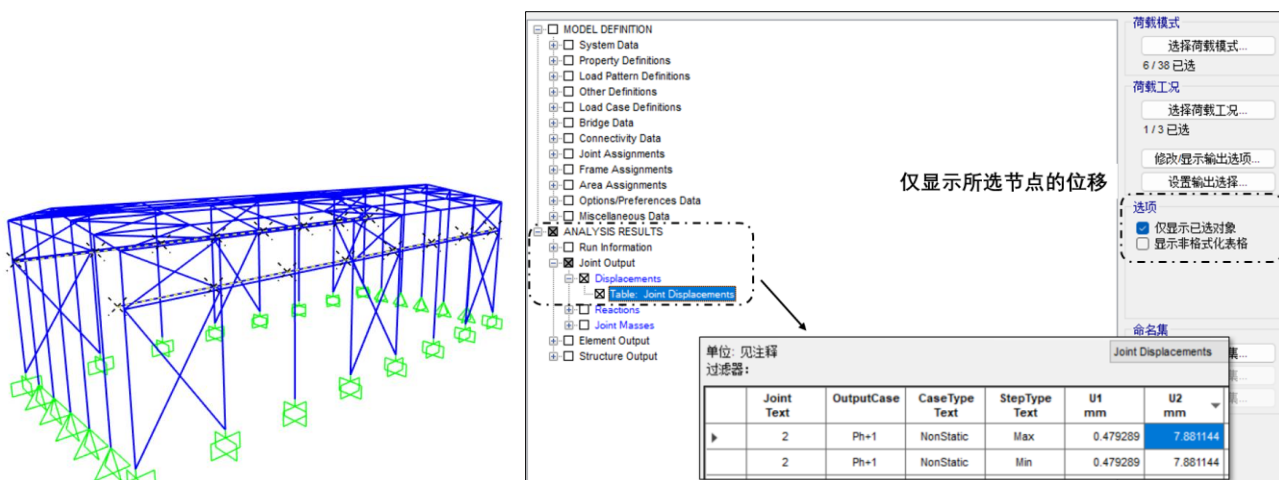


图 6 吊车侧向力荷载下吊车梁顶节点变形结果

3.2 风荷载作用下的侧移验算

风荷载下的侧移验算较为特殊，需考虑风荷载的重现期（Mean Recurrence Interval, MRI）。重现期越长，风速越高。按 AIST-TR-NO.13 规定，结构强度设计依据建筑安全性等级采用较高重现期（例如 700 年），以抵御极端强风；而验算侧移时属于正常使用状态，可采用较低重现期（10 年），以控制常遇风下的变形。

以本工程为例，建筑安全性等级为 II 级，模型中已按 700 年重现期施加了承载力验算所需的风荷载，基本风速为 145mph。现需进行 10 年重现期下的变形验算。依据 ASCE7-16^[3]式 C26.5-1，风速与重现期的换算关系式为： $F_{RA} = V(T)/V(50) = 0.45 + 0.085\ln(12T)$ 。则 MRI=10 年的风速 $V(10)$ 如下：

$$V(700)/V(50) = 145/V(50) = 0.45 + 0.085\ln(12 \times 700) \rightarrow V(50) = 119\text{mph}$$

$$V(10)/V(50) = V(10)/119 = 0.45 + 0.085\ln(12 \times 10) \rightarrow V(10) = 102\text{mph}$$

依据 ASCE7-16 式 26.10-1，基本风压的计算公式为： $q_z = 0.00256K_zK_{zt}K_dK_eV^2$ 。因此：

$$q_z(10) = q_z(700) \times V^2(10)/V^2(700) \approx 0.50q_z(700)$$

可得，10 年重现期时的基本风压是 700 年重现期的 0.5 倍。

本工程 700 年重现期风荷载下，吊车梁顶最大侧移为 47.90mm（如图 7 所示），考虑重现期折减系数 0.50 后，吊车梁顶的最大侧移量为 23.95mm，满足限值要求。

单位: 见注释 过滤器:					Joint Displacements	
	Joint Text	OutputCase	CaseType Text	StepType Text	U1 mm	U2 mm
▶	74	W+Y1	NonStatic	Max	-0.054459	47.902824
	74	W+Y1	NonStatic	Min	-0.054459	47.902824
	20	W+Y1	NonStatic	Max	0.018367	43.856044
	20	W+Y1	NonStatic	Min	0.018367	43.856044

图 7 风荷载折减后侧移结果

除此之外，也可直接定义重现期 10 年的风荷载工况，风速取 $V(10)=102\text{mph}$ ，查看该工况下的结构侧移。

4. 吊车梁轨距变形验算

轨距变形（Horizontal Crane Rail Gauge Change）是带吊车的门刚结构特有的变形验算项，旨在控制两侧吊车梁顶部轨道之间的水平距离变化。过大的轨距变化会导致吊车轮压分布不均、产生啃轨现象甚至引发运行故障。MBMA 第 3.7 条和 AIST-TR-NO.13 第 5.3 条分别给出了轨距变形验算的控制荷载和变形限值，如图 8 和图 9 所示。

轨距变形验算应考虑以下两种荷载工况：

（1）吊车荷载工况：向内相对变形（轨距收缩）主要由吊车轮压作用产生。限值为 $-1/2\text{in}$ （即 -12.7mm ），即两侧吊车梁之间的轨距变化量不得超过 12.7mm （收缩方向）。

（2）屋面荷载工况：向外相对变形（轨距扩大）主要由屋面雪荷载（本工程未考虑）、屋面活荷载产生。限值为 $+1\text{in}$ （即 $+25.4\text{mm}$ ），即两侧吊车梁之间的轨距扩大量不得超过 25.4mm 。

Loads affecting the inward or outward movement of support points are those applied to the structure after the alignment of the rails. Inward movement is by and large the result of crane loads, whereas outward movements are caused by roof loads, chiefly high snow loads.

图 8 MBMA 轨距变形控制荷载

Based on an elastic frame analysis, the variation of crane rail gauge due to gravity loads shall be within $+1\text{ in.}$ and $-1/2\text{ in.}$ of the specified gauge. Snow loads of 30 psf or less may be reduced by 50% for this condition only, and snow loads greater than 30 psf may be reduced by 25%.

图 9 AIST-TR-NO.13 轨距变形限值规定

运行吊车荷载工况和屋面活荷载工况，查看两侧吊车梁支座处的水平位移，取两者之差即可得到轨距变化量，按上述限值进行验算即可。利用 SAP2000 的“广义位移”功能，可更直观地查看轨距的相对变形。具体操作如图 10 所示：点击【定义>广义位移】，吊车梁端点两两一组，每组节点定义为一个广义位移；位移分量选择侧移方向（本例为 U2，即 Y 向），类型

选择“平动”：为计算两点间的相对变形，两个节点的比例系数分别设为“+1”和“-1”。



图 10 定义广义位移

通过【显示>表格>Analysis results>Joint output>Displacements>Joint displacements-Generalized】表格查看各组广义位移的结果。如图 11 所示，屋面活荷载下轨道向外相对变形最大值为 17mm，满足规范要求。吊车荷载下的变形亦满足要求，本文不再列出。

单位：见注释
过滤器：

GenDispl Text	DisplType Text	OutputCase	CaseType Text	StepType Text	Translation mm
GDISP2	Translation	LIVE	NonStatic	Max	-17.089318
GDISP2	Translation	LIVE	NonStatic	Min	-17.089318
GDISP1	Translation	LIVE	NonStatic	Max	-9.428497
GDISP1	Translation	LIVE	NonStatic	Min	-9.428497

图 11 屋面活荷载下轨距变形结果

5. 吊车梁挠度验算

5.1 规范依据与限值

本案例中，吊车服务等级 Service Class 为 B 级。考虑单台桥式吊车，吊车额定起重量 10t，吊车自重 90kN，小车重量 10kN。吊车梁挠度限值由建筑类别决定。如图 12 所示，依据 MBMA 表 2.9（左图）和第 2.11.3 条 Case 1（右图），建筑类别 Building Class 与吊车服务等级、应力比 R 有关。

对于桥式起重机，应力比 R 计算如下，

$$R = \frac{\text{吊车总重} TW}{\text{吊车总重} TW + \text{额定起重量} RC \times 2} = \frac{90 + 10}{90 + 10 + 100 \times 2} \approx 0.33 < 0.5$$

Table 2.9: Design Life Stress Range Fluctuations for Parts and Connections Subject to Fatigue

Service Class	Design Life Stress Range Fluctuations (nsr) ¹	
	R ≤ 0.5	R > 0.5
B	20,000	100,000
C	100,000	500,000
D	500,000	2,000,000

¹ Values refer to the value nsr found in Section 3.3 of Appendix 3 of AISC 360-16 (Ref. B4.25).

where,

- nsr = Number of stress range fluctuations in design life
- R = TW/(TW + RC) for underhung monorail cranes
- R = TW/(TW + 2RC) for bridge cranes
- RC = Rated capacity of the crane
- TW = Total weight of the crane including bridge with end trucks, hoist with trolley, and cab with walkway for cab-operated cranes

Case 1. This case applies to load combinations for members designed for repeated loads, where the number of Stress Range Fluctuations, nsr, is used as a basis for the design. Based on the owner's determination of the building class, the following stress range fluctuations are assigned:

Building Class A	500,000 to over 2,000,000
Building Class B	100,000 to 500,000
Building Class C	20,000 to 100,000
Building Class D	Not applicable to this case.

图 12 吊车等级与建筑类别对应关系

根据 MBMA 表 2.9，由吊车服务等级和应力比 R 确定应力幅循环次数 nsr 为 20000，最终得到对应的建筑类别 Building Class 为 C 类。

如图 13 所示，依据 AIST-TR-NO.13 第 5.8.7 条，C 类建筑吊车梁竖向挠度限值为梁跨度的 1/600，横向（侧向）挠度限值

为梁跨度的 1/400。本案例吊车梁跨度为 6m，则竖向挠度限值为 10mm，横向挠度限值为 15mm。

5.8.7 Deflection. Maximum vertical deflection of the girders due to a single crane load without impact shall not exceed the following ratios of the span length:

Class A buildings 1:1000
Class B buildings 1:1000
Class C buildings 1:600
Class D buildings 1:600

Maximum lateral deflection of a girder caused by a side thrust load from one crane shall not exceed 1/400 of the span length. For longer girder spans, the torsional effects caused by the combination of vertical wheel loads and lateral deflections should be considered in the analysis of the crane girder.

图 13 挠度限值

5.2 吊车梁建模及挠度验算

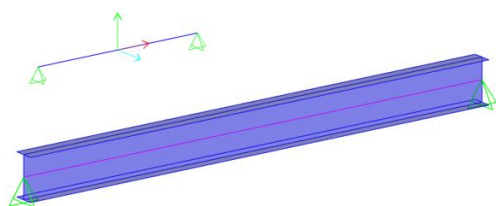
进行吊车梁挠度验算时，需从整体结构中拆解出吊车梁作为隔离体单独分析。目前的 SAP2000 版本不支持直接施加横向移动荷载，可以将吊车梁旋转 90°，使横向刹车力转化为竖向移动荷载进行加载。一般可采用线单元模型快速完成吊车梁的挠度验算；对于需要更高精度（如考虑局部应力分布、腹板变形、连接构造影响等）的场景，也可采用壳单元模型进行精细化模拟。接下来分别介绍两种建模方式。

5.2.1 线单元模型

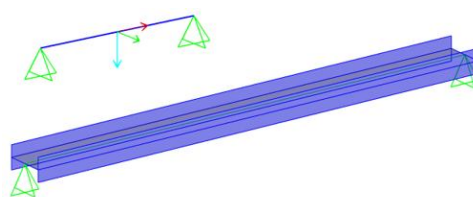
吊车梁线模型的挠度验算可采用以下操作：

(1) 建立横向变形验算模型

删除整体模型中的其他构件，仅保留单跨吊车梁，两端铰接，作为竖向变形验算模型。通过【带属性复制】，得到另一根用于横向变形验算的吊车梁。选中该梁，通过【指定>框架>局部轴】将其旋转 90°，横向刹车力即可等效为竖向移动荷载施加。如图 14 所示。



(a) 竖向变形验算吊车梁



(b) 横向变形验算吊车梁

图 14 吊车梁挠度验算线模型（拉伸视图）

(2) 施加载载

原整体模型中已定义的竖向移动荷载可继续沿用。横向刹车力荷载需等效为竖向移动荷载施加，如图 15 所示，轮距 2m，每个轮上的刹车力荷载为 5.5kN。此外，在横向吊车梁上定义相应的轨道，模拟刹车力在横向吊车梁上移动的效果。最后，分别调整竖向荷载和横向刹车力对应的移动荷载模式，如图 16 所示。



图 15 横向刹车力移动荷载



图 16 移动荷载模式

(3) 查看变形验算结果

吊车梁变形结果如图 17 所示，本案例吊车梁竖向挠度为 6.1mm，横向挠度为 6.8mm，均满足规范限值要求。



图 17 线单元模型挠度验算结果 (单位: mm)

5.2.2 壳单元模型

SAP2000 中既支持直接绘制壳单元模型, 也提供基于已有线单元快速生成壳单元的便捷方式。选中已建立的线单元梁, 点击【编辑>拉伸>转换: 线→面】, 程序即可根据线单元梁的实际截面尺寸 (包括腹板、翼缘厚度) 及其局部轴方向自动转换为精确的壳单元模型, 如图 18 所示。

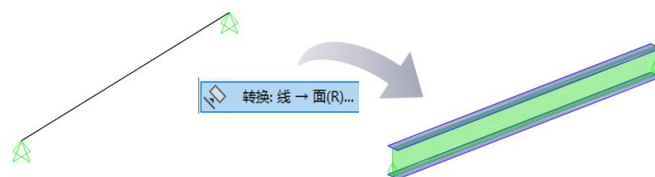


图 18 线单元模型→壳单元模型

本例创建了壳单元模型, 与线单元模型进行结果对比。精细化模型中, 吊车梁上翼缘设置了侧向约束、底部施加了竖向约束, 以更真实地反映实际支承状态。此外, 在实际受力位置 (吊车梁顶) 绘制了一根“虚梁”轨道 (截面尺寸为 1mmX1mm), 用于施加竖向轮压荷载和侧向荷载。变形结果如图 19 所示, 竖向挠度为 6.1mm, 横向挠度为 7.1mm, 与线单元模型基本一致。工程中可优先采用线单元模型进行变形验算, 必要时辅以壳单元模型进行局部校核, 以达到效率与精度的平衡。

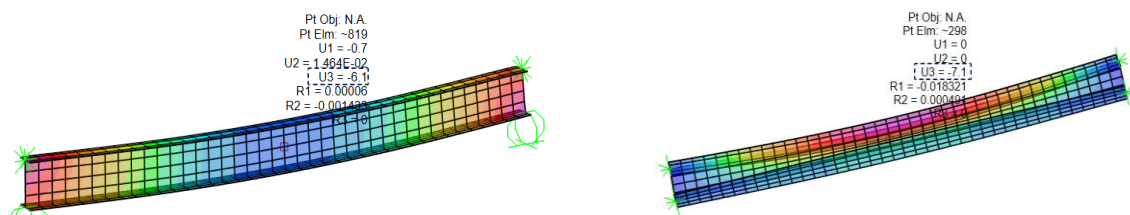


图 19 壳单元模型挠度验算结果 (单位: mm)

6. 小结

变形验算是门刚结构美标设计中不可或缺的环节。本文以一典型带吊车门刚为例, 梳理了美标体系下门刚结构变形验算的验算要点, 包括:

- (1) 屋面梁挠度验算: 直接读取梁单元在活荷载作用下的变形结果, 依据规范要求进行校核。
- (2) 结构侧移验算: 需同时考虑吊车侧向荷载和风荷载作用下的侧移。对于风荷载下的侧移验算, 应考虑重现期转换, 选取吊车梁顶部节点, 进行变形验算。
- (3) 轨距变形验算: 利用 SAP2000 的广义位移功能, 可直接提取两侧吊车梁支座节点的水平位移差值, 分别验算吊车荷载和屋面荷载下的轨距变形。
- (4) 吊车梁挠度验算: 可利用 SAP2000 的局部轴旋转功能, 将吊车梁整体旋转 90°, 使横向刹车力等效为竖向移动荷载进行施加, 从而完成横向挠度的验算。对于需要更高精度的局部应力分析, 可通过“线→面”转换功能快速建立壳单元精细化模型, 并与线单元模型进行对比验证。

以上操作要点, 为工程师使用 SAP2000 实现美标门刚结构设计提供参考。

参考文献

- [1] Metal Building Systems Manual[S]. Cleveland, Ohio: MBMA, 2018.
- [2] AIST Technical Report No.13[R]. Warrendale, PA: Association for Iron and Steel Technology, 2021.
- [3] ASCE/SEI 7-16[S]. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2017.

审定: 吴文博、李立