

## 单双层球面网壳结构非平稳随机地震响应研究\*

# The Non-stationary Stochastic Seismic Responses of Single-double Layer Reticulated Dome Structures

魏德敏<sup>1,2</sup>,杜元增<sup>1,3</sup>

WEI De-min<sup>1,2</sup>,DU Yuan-zeng<sup>1,3</sup>

(1. 华南理工大学建筑学院,广东广州 510640;2. 华南理工大学亚热带国家重点实验室,广东广州 510640);3. 广东省石油化工设计院,广东广州 510130)

(1. College of Architecture & Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong, 510640, China; 2. State Key Laboratory of Subtropics Architecture, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong, 510640, China; 3. Guangdong Petrochemical Engineering Design Institute, Guangzhou, Guangdong, 510130, China)

**摘要:**在随机振动虚拟激励法的理论基础上,采用改进的 C-P 随机模型和有限元程序 ANSYS 8.0,对一致地震动输入下周边双层中部单层球面网壳结构的非平稳动力响应进行分析.分析结果表明:单双层网壳结构形式在地震作用下受力是合理的,结构的水平(X)和竖向(Z)动位移都比较大,工程设计时应该考虑耦合效应;增加网壳结构的矢高,单双层网壳结构的内刚度增大,面外刚度减小;增大网壳结构的单双层跨度比对结构的内刚度影响不大,但是却使结构的内刚度明显减小;单双层网壳连接区域刚度的突变对结构地震响应的影响发生在与连接区域相邻或者相近的节点和杆件上,而且这种影响随着单双层跨度比的增大而趋于平缓.

**关键词:**单双层球面网壳 地震响应 非平稳随机振动 虚拟激励法

**中图分类号:**TU393.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2007)03-0265-05

**Abstract:** Based on the theory of Pseudo Excitation Method, the non-stationary stochastic seismic response of the central-single-layer and peripheral-double-layer reticulated dome structures under the consistent earthquake input are analyzed by using the updated random Cough-Penzien Model and Finite Element Program ANSYS 8.0. The analysis results indicate that the internal force distribution of the single-double layer reticulated dome structures under the earthquake action is reasonable, and the horizontal(X) and vertical(Z) dynamic displacements of the structure are both larger. The coupling effect should be taken into account in the engineering design. The plane stiffness of the single-double reticulated dome structures will increase and the stiffness outside of the plane will decrease with the increase of the depth. And the influence on the stiffness outside of the plane is very little when the span ratio of the single part to the double part increases, while the plane stiffness of the structure will change obviously. The stiffness catastrophe in the connection region of the single-double reticulated dome will influence the seismic response of the structure. The joints and members near this region will be influenced obviously, but the influence will decrease with the increase of the span ratio of the single part to the double part.

**Key words:** single-double layer reticulated dome, seismic response, non-stationary random vibration, pseudo excitation method

大跨度空间结构作为目前发展最快的一种结构类型,被日益广泛地应用于桥梁、体育场馆、大型展馆

等重要的公共设施,而这些建筑物一旦发生倒塌,后果将不堪设想.有迹象表明,我国正处在一个新的地震活跃期,因此,大跨度空间结构抗震研究是重要的研究课题之一.

大跨度结构地震反应分析理论主要为静力理论、

收稿日期:2006-10-09

作者简介:魏德敏(1955-),女,博士,教授,主要从事土木工程结构防灾减灾研究.

\* 广东省自然科学基金项目(020940)资助.

反应谱理论和动力分析理论,动力分析理论中又包括用于确定性振动的时间历程法和用于随机振动的随机振动法。其中,反应谱法、时间历程法和随机振动法是目前进行大跨度结构地震反应分析的主要方法,虚拟激励法作为一种基于概率论的结构动力分析方法,在近代工程分析中的应用日益增多<sup>[1]</sup>。

周边双层中部单层球面网壳改善了单层网壳的稳定性,克服了双层网壳浪费钢材、杆件布置稠密、节点构造困难等缺点,是一种新型的空间结构形式,本文在随机振动虚拟激励法的理论基础上,考虑非平稳地震作用,编制了相应的计算程序,对一致地震动输入下周边双层中部单层球面网壳的非平稳动力响应进行了计算分析,并考虑几何参数变化对结构地震响应的影响,得到了一些有实用价值的结果和结论。

## 1 基本方程

在均匀平稳随机地震激励作用下,结构的运动方程为

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = -[M]\{E\}\ddot{x}_g(t), \quad (1)$$

其中,  $[M]$ 、 $[C]$  和  $[K]$  分别为质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵;  $\{E\}$ 、 $\{y\}$  为惯性力指示列向量和位移列向量;  $\ddot{x}_g(t)$  为地面运动加速度,在均匀平稳随机地震激励下,该零均值平稳随机过程的自功率谱  $S_{xx}(\omega)$  为已知的。

利用振型分解法取对上式做降阶处理,令

$$\{y\} = \sum_{j=1}^q \{\phi_j\} u_j = [\Phi]\{u\}, \quad (j=1, q), \quad (2)$$

其中,  $[\Phi]$  是经过正交规格化处理后的振型矩阵;  $\{u\}$  表示广义坐标向量。

将(2)式代入(1)式,并左乘  $[\Phi]^T$ , 则得到新的运动方程

$$\{\ddot{u}\} + \text{diag}(2\zeta_j \omega_j) \{\dot{u}\} + \text{diag}(\omega_j^2) \{u\} = -[\Phi]^T [M] \{E\} \ddot{x}_g(t), \quad (3)$$

对于非平稳激励过程,常规做法是考虑强度的非平稳性,即用时间包络函数  $g(t)$  来演变地震运动的非平稳随机过程

$$f(t) = g(t) \ddot{x}_g(t), \quad (4)$$

其中,强度包络函数  $g(t)$  的形式为<sup>[2]</sup>

$$g(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2, & 0 \leq t < t_1; \\ 1, & t_1 \leq t < t_2; \\ e^{-c(t-t_2)}, & t \geq t_2. \end{cases} \quad (5)$$

根据(3)式,非平稳过程结构的运动方程可以表示为:

$$\{\ddot{u}\} + \text{diag}(2\zeta_j \omega_j) \{\dot{u}\} + \text{diag}(\omega_j^2) \{u\} =$$

$$-[\Phi]^T [M] \{E\} f(t). \quad (6)$$

求解非平稳过程位移功率谱矩阵时,构造虚拟激励<sup>[3]</sup>

$$f(t) = \sqrt{S_{xx}(\omega)} g(t) e^{i\omega t}, \quad (7)$$

把(7)式代入(6)式即可得到  $\{u\}$ 、 $\{u\}$  的功率谱密度  $[S_{uu}(\omega, t)]$  为<sup>[4]</sup>

$$[S_{uu}(\omega, t)] = \{u\}^* \{u\}^T, \quad (8)$$

将(2)式代入(8)式得到位移  $\{y\}$  的功率谱密度  $[S_{yy}(\omega, t)]$  为

$$[S_{yy}(\omega, t)] = \{y\}^* \{y\}^T = [\Phi]^* \{u\}^* \{u\}^T [\Phi]^T, \quad (9)$$

位移响应的方差由其自谱密度元素求得

$$\sigma_y^2(t) = 2 \int_0^{+\infty} S_{yy}(\omega, t) d\omega. \quad (10)$$

在计算单元内力响应功率谱密度矩阵时,根据有限元理论,首先从全局坐标系中经过一个提取变化矩阵  $[G_1]$  提取单元节点位移向量,然后由旋转变换  $[G_2]$  把单元节点位移向量转换为相对于单元坐标系的位移,单元内力响应向量  $\{N_e\}$  可由单元刚度矩阵  $[K_e]$  求出,从而得到内力响应的功率谱矩阵为:

$$[S_{NN}(\omega, t)] = \{N_e\}^* \{N_e\}^T = [K_e]^* [G_2]^* [G_1]^* [S_{yy}(\omega, t)] [G_1]^T [G_2]^T [K_e]^T, \quad (11)$$

而内力响应的方差由其自谱密度元素求得

$$\sigma_N^2(t) = 2 \int_0^{+\infty} S_{NN}(\omega, t) d\omega, \quad (12)$$

式中内力方差代表着随机振动过程中杆件内力偏离结构静态平衡位置时的分散程度,动内力值即方差的算术平方根  $\sigma_N(t)$  反映了随机激励下杆件内力的变化趋势。

对于运动方程(6)的求解,本文采用精细积分方法的 HPD-L (high precision direct integration scheme linear form) 格式<sup>[5,6]</sup>。

## 2 计算参数

### 2.1 结构参数

选取图 1 所示单双层网壳结构,该结构周边部分为双层联方型网壳,中间部分为 K6 型单层球面网壳。网壳的杆件材料为 Q235,截面为  $\Phi 186 \times 10$  的无缝钢管;结构采用周边固定铰支承,周边双层中部单层球面网壳结构的总跨度为  $L$ ,矢高为  $f$ ,单层部分的跨度为  $D$ ,网壳的厚度为 2m。

分别对跨度  $L = 60\text{m}$ 、 $75\text{m}$  和  $90\text{m}$ ;单双层跨度比  $D/L = 1/3$ 、 $1/2$  和  $2/3$  以及矢跨比  $f/L = 1/5$ 、 $1/4$  和  $1/3$  的单双层球面网壳模型共 27 组模型进行计算分析。选取图 1 中标号为 R 的一条主肋进行节点

的动位移和动内力的根方差计算。

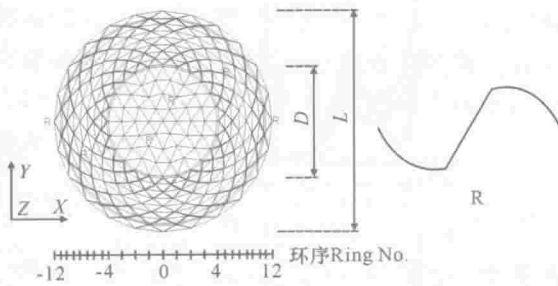


图1 单双层网壳模型

Fig.1 A single-double layer reticulated dome

D. 单层球面跨度; L. 球面总跨度

D. The span of the single part; L. The span of the single-double layer reticulated dome.

图1模型的单层部分采用刚节点,周边双层部分采用铰节点,因此在进行结构的有限元计算时,选取三种杆件单元,即:在单层部分选取空间梁单元,在双层部分选取空间杆单元,而在单层与双层连接处采用一端刚接一端铰接的梁杆混合单元。

## 2.2 地震动随机模型

地震动随机模型采用的是地震动输入为平稳过滤有色白噪声模型的改进 C-P 随机模型<sup>[7]</sup>。该模型既对低频部分进行了修正,又对基岩地震动输入进行了修正。其谱密度函数为:

$$S(\omega) = \frac{\omega_g^4 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \cdot \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_f^2 \omega_f^2 \omega^2} \frac{\omega_h^2}{\omega_h^2 + \omega^2} S_0, \quad (13)$$

其中,  $\omega_g$  和  $\zeta_g$  为卓越频率和阻尼比;  $\zeta_f$  和  $\omega_f$  为低频过滤因子;  $\omega_h$  为反映基岩特性的谱参数,取  $\omega_h = 8\pi \text{rad/s}$ <sup>[8]</sup>;  $S_0$  为谱强度因子,确定该值时需要乘以一个修正系数  $k$ <sup>[9]</sup>。

## 2.3 其他计算参数

考虑地震烈度为 8 度,设计基本加速度值为 0.2g,场地土类型为 III 类,设计地震分组为第一组,根据文献<sup>[9]</sup>取  $\omega_g = 13.96 \text{rad/s}$ ,  $\omega_f = 0.1\omega_g$ ,  $\zeta_f = \zeta_g = 0.8$ ,  $S_0 = 7.123 \text{cm}^2/\text{s}^2$ 。由于我们所考虑的网壳结构的第一周期在 0.1~1.5s 范围内,所以,取谱强度因子的修正系数  $k = 0.549$ 。III 类场地土地震动持时  $t_d = 10.92 \text{s}$ ; 强度包络函数中的参数分别取值为:  $t_1 = 1.2 \text{s}$ ,  $t_2 = 9.0 \text{s}$ ,  $c = 0.25$ 。

取地震动输入频率  $\omega$  的积分上下限为 100rad/s<sup>[10]</sup>,网壳地震效应计算振型阶数为前 20 阶<sup>[11]</sup>,设周边固定铰支承的网壳结构阻尼比  $\zeta$  为 0.02。

## 3 算例分析

采用有限元程序 ANSYS 8.0 进行结构的模态

分析,将地震动输入沿 X 方向一致性输入,采用自编程序进行结构的节点动位移和动内力根方差计算。经过对比分析,发现不同跨度结构的动力响应趋势类似,鉴于篇幅有限,本文仅对  $L = 60 \text{m}$  跨度的计算结果进行分析。

### 3.1 节点动位移

单双层球面网壳主肋 R 的上弦节点 X 方向(水平)的动位移如图 2 所示,Z 方向(竖向)的动位移如图 3 所示。节点在 X 方向的动位移可以反映结构面外刚度的相对大小,在 Z 方向的动位移可以反映结构面内刚度的相对大小。

先来分析矢高  $f$  以及单双层跨度比  $D/L$  对结构刚度的影响。图 2 和图 3 表明,在单双层跨度比  $D/L$  不变的情况下,随着矢高  $f$  的增加,节点 X 方向的动位移增大,Z 方向的动位移总体趋势是在减小。因此,结构的面外刚度减小,面内刚度增大。我们还可以看出,在矢高不变的情况下,改变单双层跨度比  $D/L$  时节点 X 方向的动位移没有明显变化,但 Z 方向动位移随  $D/L$  的增大而明显增加,因此,单双层跨度比  $D/L$  的变化对结构的面外刚度影响不大,而结构的面内刚度随着  $D/L$  的增大而减小。

中间单层网壳部分和周边双层网壳部分刚度的相互影响也是需要关注的问题。可以看到,在  $D/L$  比

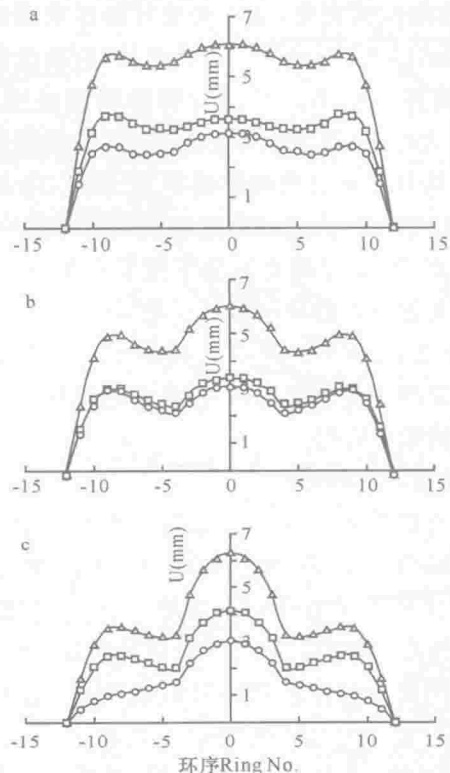


图2 上弦节点 X 方向动位移 ( $L = 60 \text{m}$ )

Fig.2 X-dynamic displacements of the upper panel joints

a.  $D/L = 1/3$ ; b.  $D/L = 1/2$ ; c.  $D/L = 2/3$

○:  $f = 12 \text{m}$ ; □:  $f = 15 \text{m}$ ; △:  $f = 20 \text{cm}$

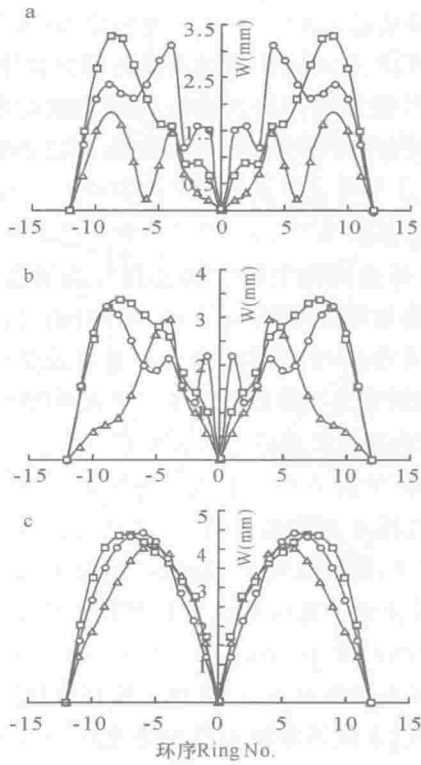


图3 上弦节点Z方向动位移 ( $L=60\text{m}$ )

Fig. 3 Z-dynamic displacements of the upper panel joints  
a.  $D/L=1/3$ ; b.  $D/L=1/2$ ; c.  $D/L=2/3$   
—○—:  $f=12\text{m}$ ; —□—:  $f=15\text{m}$ ; —△—:  $f=20\text{cm}$

较小时(见图3a),单、双层网壳的连接部分(环序为4左右)存在刚度的突变,这个突变对相邻或相近的节点(见图3a、图3b中的2、3环节点处)的动位移有较大影响,使得这些节点的动位移出现明显变化.当 $D/L$ 比较大时(见图3c),单、双层网壳连接部分刚度的突变对其节点动位移的影响不大.因此,随着 $D/L$ 的增大,单、双层网壳之间刚度的相互影响逐渐减小.

计算表明,双层网壳部分下弦节点X、Z方向的动位移与上弦节点的动位移具有相同的趋势,这里不再赘述.总之,在水平地震动输入情况下,单双层网壳的水平 and 竖向动位移都比较大,在实际工程设计中应考虑它们的耦合效应.

### 3.2 杆件轴向动内力

上弦杆件的轴向动内力如图4所示.由此看出,单层网壳部分( $\pm 4$ 环节点以内)杆件的轴向力对单双层跨度比和矢高的变化不敏感,且内力的值也较小,因此,这对改善单层网壳部分的稳定性、充分发挥周边双层网壳部分杆件的作用是有利的.由图4c发现,随着单、双层网壳跨度比 $D/L$ 的增大,单层网壳部分杆件的轴向动内力会出现峰值,显然这对单层网壳部分的稳定性是不利的.因此,在实际工程中需要通过优化分析确定合理的单、双层网壳跨度比.

下弦杆件的轴向动内力如图5所示.通过三种跨

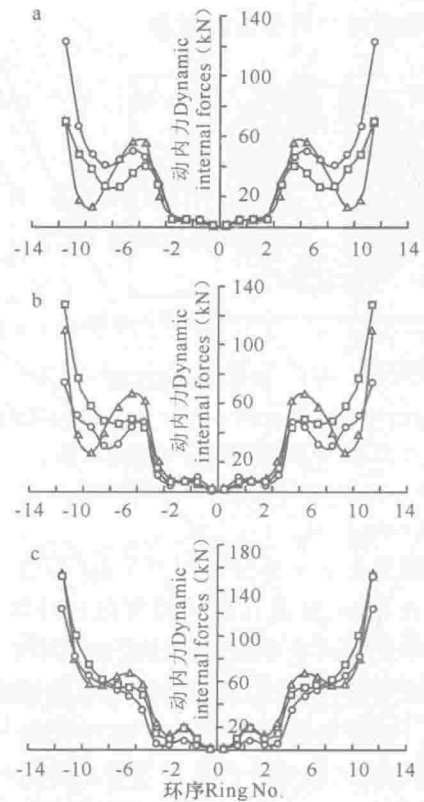


图4 上弦杆件动内力 ( $L=60\text{m}$ )

Fig. 4 Dynamic internal forces of the upper chords  
a.  $D/L=1/3$ ; b.  $D/L=1/2$ ; c.  $D/L=2/3$   
—○—:  $f=12\text{m}$ ; —□—:  $f=15\text{m}$ ; —△—:  $f=20\text{cm}$

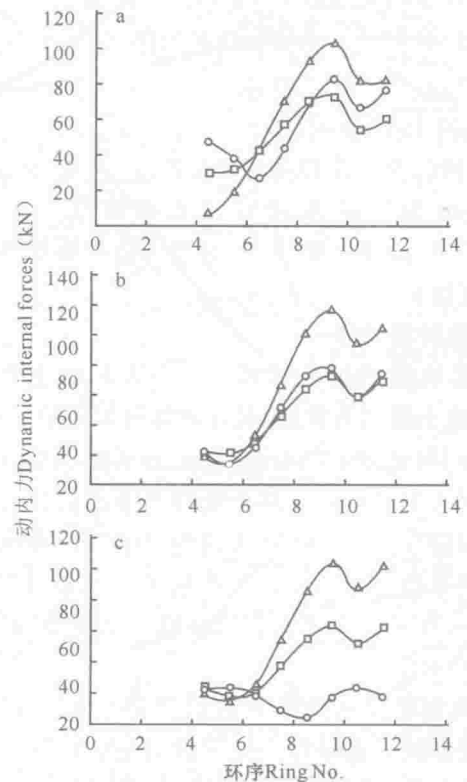


图5 下弦杆件动内力 ( $L=60\text{m}$ )

Fig. 5 Dynamic internal forces of the lower chords  
a.  $D/L=1/3$ ; b.  $D/L=1/2$ ; c.  $D/L=2/3$   
—○—:  $f=12\text{m}$ ; —□—:  $f=15\text{m}$ ; —△—:  $f=20\text{cm}$

度计算结果的综合比较分析,可以发现下弦杆件动内力的峰值均出现在环序为 $\pm 9 \sim \pm 10$ 的杆件上,单层网壳部分对下弦杆件的动内力影响主要集中在环序为 $\pm 4 \sim \pm 8$ 的杆件上.随着单、双层网壳跨度比 $D/L$ 的增大,杆件轴向动内力的值减小.

#### 4 结论

通过对典型单双层球面网壳结构非平稳随机地震响应的计算分析可以得到以下结论:

(1)单双层网壳结构形式在地震作用下受力是合理的,结构的水平(X)和竖向(Z)动位移都比较大,工程设计时应该考虑耦合效应;

(2)增加网壳结构的矢高,单双层网壳结构的内刚度增大,面外刚度减小;

(3)增大网壳结构的单双层跨度比,对结构的面外刚度影响不大,但使结构的面内刚度明显减小;

(4)单双层网壳连接区域刚度的突变对结构地震响应的影响发生在与连接区域相邻或者相近的节点和杆件上,且这种影响随着单双层跨度比的增大而趋于平缓.

#### 参考文献:

[1] 林家浩,张亚辉.随机振动的虚拟激励法[M].北京:科学出版社,2004.  
[2] AMIN M,ANG A H-S. Nonstationary stochastic model

of earthquake motion[J]. Jour Eng Mech Div, ASCE, 1968,94(EM2):559-584.  
[3] 林家浩.非平稳随机地震响应的精确高效算法[J].地震工程与工程振动,1993,13(1):24-29.  
[4] LIN J H,SUN D K,SUN Y,et al. Structural responses to non-uniformly modulated evolutionary random seismic excitations[J]. Communications in Numerical Methods in Engineering, 1997,13:605-616.  
[5] 钟万勰. 暂态历程的精细计算方法[J]. 计算结构力学及其应用,1995,12(1):1-6.  
[6] LIN JIAHAO, SHEN WEIPING, WILLIAMS F W. A high precision direct integration scheme for structures subjected to transient dynamic loading[J]. Computer & Structure, 1995, 56(1):113-120.  
[7] 李春祥,翟文杰.改进的 Clough-Penzien 地震地面运动模型[J].地震工程与工程振动,2003,23(5):53-56.  
[8] 王雪生.网壳结构多维多点非平稳随机响应分析研究[D].北京:北京工业大学,2002.  
[9] 欧进萍,牛荻涛,杜修力.设计用随机地震动的模型及其参数确定[J].地震工程与工程振动,1991,11(3):45-53.  
[10] 曹资,薛素铎,张毅刚,等.单层球面网壳在多维地震作用下的随机响应分析[J].空间结构,2002,8(2):3-11.  
[11] 网壳结构技术规程(JGJ 61-2003)[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.

(责任编辑:韦廷宗)

### 科学家修改 H5N1 病毒帮助疫苗研究

科学家修改了 H5N1 病毒的一个蛋白,从而使其用于发现哪些突变可能让这种病毒进行人际传播,并创造出能用来制作预先防范性疫苗的毒株。

H5N1 病毒引发了禽流感,它也能偶然传给人类。目前还没有报道 H5N1 禽流感病毒在人际间传播的病例。科学家相信,如果这种病毒要在人际传播,它表面的一种名为血凝素的刺状蛋白必须发生变异。血凝素蛋白的一个称之为受体结合区(RBD)的部分与宿主细胞的特定部分结合在一起之后,这种病毒才能再进入宿主细胞。

科学家让 H5N1 禽流感病毒受体结合区发生特定变化,然后测试结构发生变化的受体结合区识别禽类和人体细胞的能力。他们并没有使用真的禽流感病毒,而是在一种人造病毒上改变了血凝素蛋白的受体结合区(RBD)。这种人造病毒被称为假病毒,它不会引起疾病,但也能成为 H5N1 病毒的一个良好模型。

创造的新的病毒毒株可以被用来制造疫苗库存,对付可能的 H5N1 禽流感病毒变异。这种方法能指导开发疫苗和治疗性抗体,在 H5N1 禽流感病毒变得适应人际传播之前就可以评估这些疫苗和抗体。这种方法也许能有助于通过不同方法开发的疫苗在血凝素蛋白上面找到一些通用的靶点。科学家们还需要更多的研究来测试被鉴别出来的血凝素蛋白的变异与携带它的假病毒之间可能发生的相互作用,也要认真研究这种相互作用引发的安全性问题。

(据科学网)