

文章编号: 1007-6735(2006)01-0014-05

一种抛物面天线形状误差的合理评价方法

王从思, 段宝岩, 仇原鹰, 杜敬利

(西安电子科技大学 机电工程学院, 西安 710071)

摘要: 针对有限元软件 ANSYS 在分析计算天线变形表面误差时存在的问题, 提出了一种基于拟合抛物面的表面形状误差改进算法。推导了精确计算变形反射面轴向、法向与径向误差的公式。分别采用改进算法与 ANSYS 软件对某 7.3 m 圆抛物面天线多种工况下的表面误差进行了分析, 结果证明该方法是正确的, 可作为天线超差的二次判据。

关键词: 抛物面天线; 变形反射面; ANSYS 软件; 法向误差; 径向误差**中图分类号:** TN 820.28 **文献标识码:** A

Improved evaluation for calculating shape errors of parabolic antennas

WANG Cong-si, DUAN Bao-yan, QIU Yuan-ying, DU Jing-li

(School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: It is a key to analyze the electrical performances of antenna that the surface errors of distorted reflector are obtained accurately. An improved method to compute surface errors of antenna is presented against the problem caused by employing the unprecise method in ANSYS software to analyse the corresponding errors in distorted reflectors. The mathematic formulae to compute the errors in the axial, normal and radial directions of distorted surface are deduced in detail. The surface errors of a 7.3 m parabolic reflector antenna working under different conditions in engineering are analyzed and calculated. The comparison of results by ANSYS software with that of improved method is obtained simultaneously. The simulation results verify the correctness and accuracy of improved method. Its application in engineering can reduce the cost of antenna design and provide the precise error information of distorted antenna for electrical designer.

Key words: parabolic antenna; distorted reflector; ANSYS software; normal deviation; radial deviation

抛物面天线已广泛应用于卫星通讯、雷达技术、宇宙探索、地面跟踪及射电天文等现代技术领域中, 其目的是保证天线电性能指标^[1]。工程中, 天线反射面在制造与安装时往往不能与原设计抛物面完全吻合, 并且在各种外部因素如受自重、日晒、冰荷及

风雨雪等作用也会发生变形, 导致天线表面精度大大降低^[2]。然而, 天线电性能指标在很大程度上依赖于反射面表面精度, 而表面精度又取决于背架和中心体的刚度、反射面的加工精度, 以及反射面板装配的准确度, 最终影响天线电性能指标要求的满足,

收稿日期: 2005-04-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50475171); 国防预研资助项目(41501100113)

作者简介: 王从思(1980-), 男, 博士研究生。

如天线效率降低、副瓣电平变高及方向性变差等^[3]。随着天线工作环境越来越复杂,工作频段愈来愈高,准确分析其变形反射面的表面精度就显得非常重要。

大型通用有限元分析软件 ANSYS 在天线结构分析中有着广泛的应用。天线结构设计人员利用 ANSYS 软件提供的后处理数据功能,可对变形面天线的表面误差进行计算。但工程中有时会出现这种情况,ANSYS 软件的分析结果高于精度指标,而实际天线却是满足精度要求的。如果此时天线结构设计人员仅根据 ANSYS 软件的分析就判断天线结构不满足设计要求,会导致设计成本的增加、设计周期的延长。针对这种问题,作者在拟合抛物面的基础上,提出了一种改进的抛物面天线变形误差算法,给出了分析天线电性能所需的反射面法向误差与径向误差的计算公式。针对不同工况下的某 7.3 m 圆抛物面天线,分别采用 ANSYS 软件方法与改进方法对其进行了表面变形误差的分析与评价。

1 ANSYS 软件计算方法

变形反射面的均方根误差是衡量天线结构设计成败的主要依据,其数值必须小于规定值^[4]。天线结构设计人员利用 ANSYS 软件后处理中的数据运算功能计算反射面均方根误差,从而判断设计结构能否满足要求。

在有限元分析软件 ANSYS 中,天线变形反射面的均方根(轴向)误差的计算公式为^[5,6]

$$\delta_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta z_i - \bar{\Delta}z)^2}{N}} \quad (1)$$

式中 Δz_i ——各节点的轴向变形值

$\bar{\Delta}z$ ——N 个节点变形 Δz_i 的均值

N ——采样点数

启动 ANSYS 软件,进入菜单路径 Utility → Select → Entities,选择背架上弦节点上的所有质量元,建立单元选择集,使 Element Table 运算只对所选择的单元起作用。然后进入后处理中的 Element Table 菜单,用 Define Table 项把轴向变形定义为,用 Sum of Each Items 项求 $\sum_{i=1}^N \Delta z_i$,用 Add Items 项求 N 个节点的 $\Delta z_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta z_i$ 的值 $\Delta z'_i$,用 Multiply 项求出每个 $\Delta z'_i$ 的平方值 σ_i ,用 Sum of Each Items 项求每个 σ_i 的和 $\sum_{i=1}^N \sigma_i$,最后利用计算器对 $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i$ 进行

开方计算,即得到天线变形反射面的均方根误差。变形面天线的法向均方根误差的计算原理类似,需先分析背架上弦节点的法向位移。

由 ANSYS 软件计算天线表面精度的过程可知,均方根误差的计算基础是设计抛物面上的采样节点位移。限于软件功能,此方法只能简单地对 N 个节点位移进行取平均值求和开方计算,其计算属于一种近似计算,并不能反映反射面变形的真实情况。作者认为,反射面均方根误差的计算应建立在拟合变形反射面的基础上,即应该首先拟合变形反射面,然后分析每个节点对拟合抛物面的偏差,最后计算此偏差对应的均方根值。

2 改进的变形表面误差算法

令天线拟合抛物面相对全局坐标系 $oxyz$ 有 6 个几何变形参数^[7]: $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \phi_x, \phi_y, \Delta f$,其中 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 为拟合抛物面顶点的位移, ϕ_x, ϕ_y 分别为拟合抛物面的焦轴绕 x, y 坐标轴的转角, Δf 为焦距变化量,如图 1 所示。

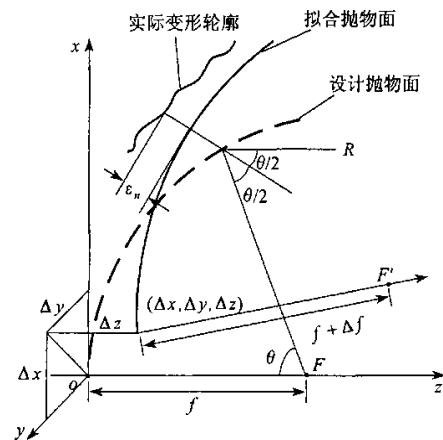


图 1 设计、拟合抛物面的几何关系

Fig. 1 Geometric relations between design and fitted surface

计算实际变形轮廓曲面对拟合抛物面的偏差,令其最小来确定拟合抛物面的 6 个参数,最终确定拟合抛物面方程

$$z \approx \frac{(x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2}{4(f + \Delta f)} + \Delta z + y\phi_x - x\phi_y \quad (2)$$

式(2)的解为

$$\mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{a}} = \mathbf{H} \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{2f} & \sum \frac{x_i y_i}{2f} & -\sum x_i & -\sum x_i y_i & \sum x_i^2 & \sum \frac{x_i z_i}{f} \\ \sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{2f} & \sum \frac{y_i^2}{2f} & -\sum y_i & -\sum y_i^2 & \sum x_i y_i & \sum \frac{y_i z_i}{f} \\ \sum_{i=1}^n \frac{x_i z_i}{2f} & \sum \frac{y_i z_i}{2f} & -\sum z_i & -\sum y_i z_i & \sum x_i z_i & \sum \frac{z_i^2}{f} \\ \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{2f} & \sum \frac{y_i}{2f} & -n & -\sum y_i & \sum x_i & \sum \frac{z_i}{f} \end{bmatrix}$$

$$\hat{\mathbf{a}} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z, \phi_x, \phi_y, \Delta f)^T$$

$$\mathbf{H} = \left(\sum_{i=1}^n (z_i - z'_i) x_i \quad \sum_{i=1}^n (z_i - z'_i) y_i \quad \sum_{i=1}^n (z_i - z'_i) z_i \quad \sum_{i=1}^n (z_i - z'_i) \right)^T$$

基于拟合抛物面方程就可计算实际变形反射面的轴向、法向与径向误差,以及表面精度.这里先分析法向误差 ϵ_n 的计算方法^[8].

在图2中,点 $P(x_p, y_p, z_p)$ 为反射面节点变形前的位置,点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 为此节点 P 变形后的实际位置,点 P_1 为实际节点 P_0 沿法线方向与拟合抛物面的交点.这里,假设节点变形后的位置对拟合抛物面的法线方向余弦,近似等于原设计抛物面上相应位置的法线方向余弦.

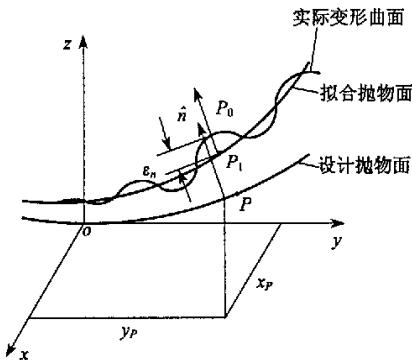


图2 变形面天线的法向误差

Fig. 2 Normal error of distorted reflector antenna

令过点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 的直线方程为

$$\frac{x - x_0}{l} = \frac{y - y_0}{m} = \frac{z - z_0}{n} \quad (4)$$

式中 l, m, n —— 直线的方向余弦

$$l = \frac{-x_p}{2\sqrt{f(f+z_p)}}, \quad m = \frac{-y_p}{2\sqrt{f(f+z_p)}},$$

$$n = \sqrt{\frac{f}{f+z_p}} \quad (5)$$

为了公式书写与推导方便,引入下列变量

$$c_1 = \frac{l}{n}, \quad c_2 = -\frac{l}{n}z_0 + x_0, \quad c_3 = \frac{m}{n}, \quad c_4 = -\frac{m}{n}z_0 + y_0$$

$$s_1 = 4(f + \Delta f)$$

$$s_2 = \frac{c_1^2 + c_3^2}{s_1}$$

$$s_3 = \frac{2[c_1(c_2 - \Delta x) + c_3(c_4 - \Delta y)]}{s_1}$$

$$s_4 = c_3\phi_x - c_1\phi_y$$

$$s_5 = \frac{(c_2 - \Delta x)^2 + (c_4 - \Delta y)^2}{s_1}$$

$$s_6 = \Delta z + c_4\phi_x - c_2\phi_y$$

代入式(2)整理,可得

$$s_2 z^2 + (s_3 + s_4 - 1)z + s_5 + s_6 = 0 \quad (6)$$

求解此方程,得到交点 P_1 的 z 坐标.这里需特别注意的是,应取 z 值较小的那个.这是因为空间直线与抛物面有两个交点,分析抛物面法线方向特点,可知过实际节点的直线与拟合抛物面的距离最近的交点是 z 值小的那个.

变形后的节点 P_0 沿抛物面法线方向与拟合抛物面的交点 P_1 的坐标为

$$\left. \begin{aligned} x'_0 &= c_1 z + c_2 \\ y'_0 &= c_3 z + c_4 \\ z'_0 &= \frac{1 - s_3 - s_4 - \sqrt{(s_3 + s_4 - 1)^2 - 4s_2 s_5 - 4s_2 s_6}}{2s_2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

则节点 P_0 对拟合抛物面的法向偏差为

$$\epsilon_n = \sqrt{(x_0 - x'_0)^2 + (y_0 - y'_0)^2 + (z_0 - z'_0)^2} \quad (8)$$

因此,天线变形反射面的法向均方根误差为

$$\delta_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\epsilon_n^i)^2}{N}} \quad (9)$$

在分析变形反射面的光程差时,有时也需要知道反射面的径向误差,如图 3 所示,其中 n 为节点单位法线方向。根据图形可知,相应的光程差等于 $\Delta\rho(1 + \cos\varphi)$ 。

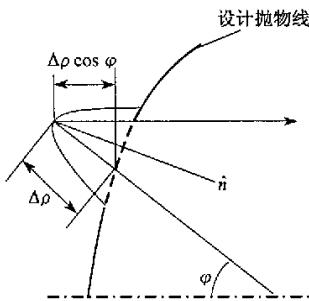


图 3 反射面的径向误差

Fig. 3 Radial deviation of reflector

根据拟合抛物面方程,可知其焦点(见图 4)在全局坐标系 $oxyz$ 中的坐标为

$$\left. \begin{aligned} x_{F'} &= \Delta x + (f + \Delta f)\phi_y \\ y_{F'} &= \Delta y - (f + \Delta f)\phi_x \\ z_{F'} &= f + \Delta f + \Delta z \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

此时,节点径向方向为变形后的节点与拟合抛物面新焦点的连线方向,其方程为

$$\frac{x - x_{F'}}{x_0 - x_{F'}} = \frac{y - y_{F'}}{y_0 - y_{F'}} = \frac{z - z_{F'}}{z_0 - z_{F'}} \quad (11)$$

以下计算过程与上述法向误差的类似,即首先要确定交点 P_1 的坐标,然后计算节点径向误差与表面径向均方根误差。

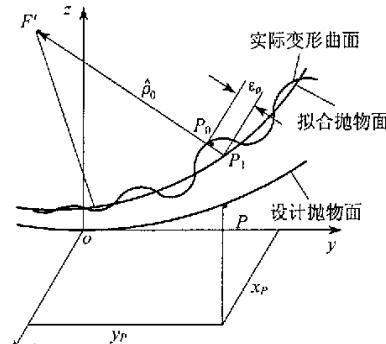


图 4 变形面天线的径向误差

Fig. 4 Radial error of distorted reflector antenna

3 实验验证

现对某研究所的 7.3 m 圆抛物面天线(焦距为 2.533 592 6 m)的变形表面误差进行分析与评价。此天线反射面是实板型,骨架属桁架类,整个天线沿中心体圆周均匀布有 16 片辐射梁。沿天线下弦杆的圆周布有 3 圈环形梁,即每两片辐射梁之间有 3 根环形梁,整个天线共有 48 根环形梁。环形梁用无缝钢管制成,两端通过单螺栓与辐射梁相连。反射面由 2 mm 厚的硬铝板(LY12-M)拉制而成,整个天线使用了 16 片扇形反射面,是典型的壳结构,将其视为壳单元(在 ANSYS 中取 shell63)。为提高反射面的刚度,在反射面的背面布有 Z 型铝型材加强筋。天线表面法向精度要求为 0.5 mm,工作环境温度为 $-45 \sim 60$ °C,工作风速为 20 m/s,生存风速为 55 m/s。

表 1 和表 2 分别给出了天线处于不同俯仰角,受到自重与不同风速的风荷作用下,变形反射面轴向误差与法向误差的变化情况。表中天线仰角指天线的焦轴与水平面的夹角。

表 1 不同工况下天线反射面的轴向误差

Tab. 1 Axial errors of antenna reflector under different conditions

仰角 $E/(^\circ)$	风速 $v/(m \cdot s^{-1})$	ANSYS 软件			改进算法			mm
		最大值 M_a	最小值 M_i	均方根 R_{ms}	最大值 M'_a	最小值 M'_i	均方根 R'_{ms}	
0	20	0.019 943	-1.293 350	0.223 357	0.587 046	-0.552 744	0.142 786	
	30	-0.005 545	-3.116 394	0.533 457	1.505 876	-1.411 509	0.370 757	
30	20	-0.002 074	-1.356 200	0.242 511	0.746 623	-0.632 755	-1.857 812	
	30	-0.004 670	-3.766 252	0.634 540	0.157 831	1.938 351	0.424 890	
60	20	-0.002 473	-1.650 098	0.232 184	0.781 984	-1.100 888	0.173 004	
	30	0.071 331	-4.630 939	0.650 458	2.136 623	-3.130 771	0.477 336	
90	20	1.214 439	-1.133 198	0.419 285	0.770 467	-0.768 236	0.164 157	
	30	3.545 810	-2.975 706	1.165 255	2.150 930	-2.123 386	0.456 522	

表2 不同工况下天线反射面的法向误差

Tab.2 Normal errors of antenna reflector under different conditions

仰角 $E/(^\circ)$	风速 $v/(m \cdot s^{-1})$	ANSYS 软件			改进算法			mm
		最大值 M_a	最小值 M_i	均方根 R_{ms}	最大值 M'_a	最小值 M'_i	均方根 R'_{ms}	
0	20	1.398 340	0.002 228	0.476 217	0.476 387	0.000 005	0.129 236	
	30	3.331 133	0.006 671	1.272 202	1.237 244	0.000 031	0.334 692	
30	20	1.455 193	0.002 979	0.512 354	0.605 908	0.000 036	0.141 651	
	30	4.070 625	0.006 229	1.359 513	1.584 551	0.000 015	0.379 962	
60	20	1.801 100	0.001 484	0.450 682	0.893 403	0.000 014	0.151 587	
	30	5.079 105	0.004 012	1.188 166	2.541 346	0.000 012	0.417 729	
90	20	1.368 105	0.000 037	0.460 479	0.625 130	0.000 002	0.148 071	
	30	3.969 796	0.000 012	1.279 719	1.744 963	0.000 037	0.411 811	

分析两表中的数据可知,随着天线仰角的增大,变形反射面的均方根误差先增大后减小.两种不同计算方法得到的误差最大值与最小值明显不同,改进算法得到的数值要远小于利用 ANSYS 软件得到的. ANSYS 软件分析得到的变形反射面的轴向均方根误差与法向均方根误差的大小差别比较大,而改进算法得到的比较接近.

利用 ANSYS 软件分析天线表面均方根误差,有时会大于给定的表面精度指标,如果据此就判断当前的天线结构不符合要求,需重新设计,那就会造成设计成本的增加. 实际上,利用改进算法分析当前天线结构得到的结果可能是满足要求的. 例如在表 2 中,当天线仰角为 90° ,风速为 30 m/s 时,ANSYS 软件分析的结果是法向均方根误差为 $1.279\ 719 \text{ mm}$,远大于 0.5 mm 的精度要求,而改进算法分析结果是 $0.411\ 811 \text{ mm}$. 后者表明,天线结构满足精度要求,而且在实际工程中,此天线是满足工作要求的. 这说明当前天线结构满足表面精度要求,不需要重新修改或补偿^[9]. 同时,这也表明 ANSYS 软件分析的结果超差,并不意味着天线形面就是超差的,应该采用本文提出的改进算法重新分析,以提高超差判定的准确性.

4 结 论

本文分析研究了采用 ANSYS 软件来判定天线变形表面误差时存在的问题,提出了一种改进的抛物面天线变形误差算法与评级方法,推导了反射面轴向误差、法向误差与径向误差的计算公式. 通过某 7.3 m 圆抛物面天线的实验,证明可把该改进算法

作为判定天线是否超差的二次判据. 在天线设计工程中,应用改进的抛物面天线变形误差算法,将会帮助天线结构设计人员准确分析天线表面精度,降低设计成本,同时也为天线电气设计人员提供准确的变形反射面误差信息.

参考文献:

- [1] SINTON S, RAHMAT-SAMII Y. Random surface error effects on offset cylindrical reflector antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(6): 1 331 – 1 337.
- [2] DUAN B Y, QI Y H, XU G H, et al. Study on optimization of mechanical and electronic synthesis for antenna structures [J]. Int J Mechatronics, 1994, 4(6): 553 – 564.
- [3] BOAG A, LETROU C. Fast radiation pattern evaluation for lens and reflector antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(5): 1 063 – 1 068.
- [4] 叶尚辉. 天线结构设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [5] 李黎明. ANSYS 有限元分析实用教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [6] 骆天舒, 戴韧. 向心透平叶轮振动频率的有限元分析 [J]. 上海理工大学学报, 2004, 26(2): 117 – 120.
- [7] 王从思, 段宝岩, 仇原鹰. 基于最小二乘法的天线变形反射面的拟合 [J]. 现代雷达, 2004, 26(10): 52 – 55.
- [8] 王伯年, 王宏光. 误差函数计算方法的研究 [J]. 上海理工大学学报, 2004, 26(6): 529 – 532.
- [9] IMBRIALE W A. Distortion compensation techniques for large reflector antennas [A]. Proc of IEEE Aerospace Conference [C], 2001, 2: 10 – 17.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>