

# 机载天线辐射方向图研究

曹祥玉 项铁铭 马凤国 梁昌洪

(西安电子科技大学, 西安 710071)

TN82 A

**摘 要:** 本文采用一致性几何绕射理论分析了某型载机机体对其上安装的单极子天线辐射方向图的影响, 计算了天线经机体散射后的场, 编制了计算程序, 调用该程序可计算机载天线任意面方向图及立体方向图。其结果可用于天线间耦合特性分析和机载多天线配置优化研究。

**关键词:** 单极子, 一致性几何绕射理论, 辐射方向图

## Study of the Airborne Antenna Pattern

CAO Xiangyu, XIANG Tieming, MA Fengguo, LIANG Changhong

(Xidian University, Xi'an 710071)

**Abstract:** In this paper, UTD is employed in conjunction with approximate models of the aircraft structure to analyze the effect of the aircraft on the monopole pattern. The scattering fields are computed and the volumetric pattern of monopole antenna mounted on the fuselage of an aircraft is obtained. The results of this paper can be used to analyze the coupling between antennas and study the airborne antenna disposition optimization.

**Key words:** Monopole antenna, UTD, Radiation pattern

## 1 引言

飞机机体是一个复杂的电磁散射体, 机身、机翼、进气道、起落架等机体上所有凸体都有可能对机载天线产生散射作用, 引起天线辐射方向图畸变。因此, 准确分析天线散射场, 在天线设计、安装的初始阶段预测天线经机体散射后方向特性, 避免浪费大量的人力、物力, 并最终获得天线的最佳性能显得尤为重要。对空中飞行器这样一个电大尺寸物体, 矩量法、FDTD 及其它计算方法由于耗时大而难于求解, 而一致性几何绕射理论(UTD)是非常有效的方法。UTD 是 20 世纪 70 年代孔琼和帕萨克(Kouyoumjian and Pathak)以及刘易斯和博埃兹马(Lewis and Boersma)<sup>[2~3]</sup>在凯勒(J. B. Keller)几何绕射理论(GTD)基础上提出的。国外在 20 世纪 80 年代初, 采用 UTD(GTD)对机载天线方向图有过大量报道<sup>[4~7]</sup>, 并开发了软件, 如 ATACAP 软件, 但并未有详细的分析计算过程。国内在 80 年代对 GTD 也有过一些报道, 但多局限于如圆柱、平板等简单部件的一次射线寻迹或计算, 对机体这样一个大型复合体散射场计算的详细报道尚未见到, 而这一问题在机体电磁兼容预测中是非常重要的。本文结合实际工程, 分析计算了载机对天线方向图的影响, 并开发了相应软件, 运行该软件可预测机体表面任意位置天线方向图, 为机载收发天线隔离度计算、天线位置优化配置以及电磁兼容预测奠定了基础。

## 2 计算公式

一致性几何绕射理论(UTD)的绕射系数是通过平面波在理想导电劈上的绕射和理想导电圆柱上的绕射两个典型问题的解推广的, 在利用 UTD 分析机载天线辐射方向特性时, 首先应将载机进行分解, 分解成许多能利用 UTD 求解的典型部件的组合, 如图 1 所示。

• 收稿日期:2001-09-11; 定稿日期:2002-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(69871021)

机头、机尾等效为椭圆,机身等效为圆柱,机翼等效为有限平板,进气道等效为空心圆筒,这样,计算机体对天线辐射方向图的影响就归结为计算下列场分量:1)直射场;2)反射场;3)曲面绕射场(来自机头、机尾、机身);4)边缘绕射场;5)二次及二次以上的绕射场。其总散射场为各部分散射场之和:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \delta_i \vec{E}_i$$

其中: $\vec{E}_i$ ——各类射线场(如直射、反射、绕射、高次绕射等);

$n$ ——飞机组件的总个数;

$\delta_i$ ——该射线的遮挡因子( $\delta=1$ ,无遮挡; $\delta=0$ ,有遮挡)。

## 2.1 单极子等效源

对理想导电光滑凸曲面上的单极子,单极子上任意一点 $Q'$ 的无穷小电流矩为:

$$d\vec{P}_s(Q') = I(l') dl' \hat{n}'$$

其中 $I(l')$ 表示单极子上的电流分布, $l'$ 是从单极子底部 $Q'$ 沿极子长度的距离。于是理想导电曲面存在时辐射的电流矩 $d\vec{P}_s(Q')$ 就构成了曲面外 $P$ 点的电场 $d\vec{E}_s(P|l')$ 的等效源。

当 $P$ 点在亮区时:

$$dE_s(P|Q') = \int_0^L d\vec{P}_s(l') \cos(kl' \cos(\theta_i)) dl' = \frac{\cos(kL \hat{n}' \cdot \hat{s}) - \cos(kL)}{[1 - (\hat{n}' \cdot \hat{s})^2] \cdot \sin(kL)} \hat{n}' \quad (1)$$

当 $P$ 点在阴影区时:

$$dE_s^d(P|Q') = \int_0^L d\vec{P}_s(l') dl' = \frac{1 - \cos(kL)}{\sin(kL)} \hat{n}' \quad (2)$$

## 2.2 亮区直射场

当发射天线(单极子) $d\vec{P}_s$ 位于曲面上 $Q'$ 处,场点 $P$ 位于照明区,则 $Q'$ 点源天线产生的直射场:

$$d\vec{E}_s(P_s|Q') = d\vec{P}_s(Q') \vec{T}_s e^{-jk/s} \quad (3)$$

$\vec{T}_s$ 为照明区直射场并矢系数:

$$\vec{T}_s = \frac{-jkZ_0}{4\pi} (\hat{n}' \hat{n} M + \hat{n}' \hat{b} N)$$

其中: $\hat{s}$ 为源点 $Q'$ 到场点 $P$ 直线的单位矢量; $\hat{n}'$ 为 $Q'$ 曲面的单位法向矢量; $\hat{b}$ 为 $PQ'$ 在曲面上投影方向的单位矢量; $\theta$ 由 $\hat{n}' \cdot \hat{s} = \cos \theta$ 定义; $k$ 为自由空间波数, $k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ ;  $z_0 = 120\pi$ 为自由空间波阻抗; $M$ 、 $N$ 是从理想导电圆柱和圆球上辐射的典型问题渐进解中导出的,参见文献[1]。

## 2.3 亮区反射场

当射线从源投射到一个光滑凸曲面上时将被散射,散射场的计算可采用推广的圆柱散射的UTD结果。为计算方便,采用如图2所示的反射射线基坐标系。

设 $Q_R$ 是物体上的反射点, $\vec{E}(Q_R)$ 是反射点 $Q_R$ 处的入射场, $s$ 是反射点到场点的距离, $\rho_1, \rho_2$ 是反射面两主曲率半径, $[R]$ 是反射系数矩阵。对入射线、反射线分别采用图2所示的射线基坐标系,则

$$\vec{E}^r(P) = \vec{E}(Q_R) \cdot \vec{R}_{s,h} \sqrt{\rho_1 \rho_2 / (\rho_1 + s)(\rho_2 + s)} e^{-jk/s} \quad (4)$$

对象散波(点源发射必是象散波),在远场由于 $s \gg \rho_1, s \gg \rho_2$ ,则(4)式的反射场可简化为:

$$\vec{E}^r(P) = \vec{E}(Q_R) \cdot \vec{R}_{s,h} \sqrt{\rho_1 \rho_2} e^{-jk/s} \quad (5)$$

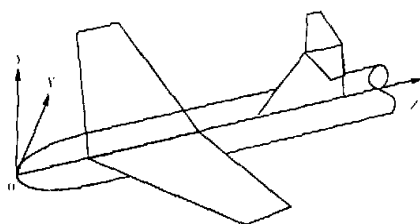


图1 机体简化模型

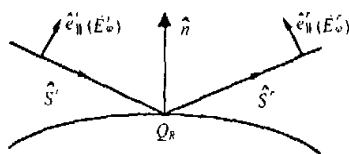


图2 反射射线基坐标系

其中:

$$R_{s,h} = \sqrt{\frac{-4}{\xi'}} \exp(-j \frac{(\xi')^2}{12}) \left\{ \frac{\exp(-j\pi/4)}{2\xi' \sqrt{\pi}} (1 - F(kL'\hat{a}')) + \tilde{P}_{s,h}(\xi') \right\} \exp(-jkl)$$

$$\xi' = -2M \cos(\theta_i), L' = L, \hat{a}' = 2 \cos^2(\theta_i)$$

## 2.4 阴影区绕射场<sup>[2]</sup>

根据 UTD, 当源在曲面上, 而场点  $P$  在阴影区, 经曲面散射, 在  $P$  点产生的绕射场为:

$$d\tilde{E}_s(P/Q') = d\tilde{P}_s(Q') T_s(Q'/Q) \sqrt{\frac{\rho_s}{s(\rho_s + s)}} e^{-jk s} \quad (6)$$

其中:  $\rho_s$  为曲面绕射焦距距离;  $s$  为绕射点到场点的距离。  $\tilde{T}_s(Q'/Q)$  可看成一传输函数, 它不仅描述了  $Q'$  点处表面射线场的发射和沿从  $Q'$  点到  $Q$  点的短程线路径上表面射线场的振幅和相位变化, 还描述了这一表面射线场在  $Q$  点的绕射

$$\tilde{T}_s(Q'/Q) = \frac{-jkZ_0}{4\pi} [\hat{n}' \hat{n} T_s(Q') H + \hat{n}' \hat{b} T_s(Q') S] e^{-jk s} \cdot \sqrt{\frac{d\varphi}{d\eta(Q)} \left[ \frac{\rho_s(Q)}{\rho_s(Q')} \right]^{\frac{1}{6}}} \quad (7)$$

式(7)各参数的具体定义参见文献[1]。

## 2.5 边缘绕射场

如图 3 所示, 当电磁波向导电边缘, 如直劈、进气道口、曲劈、平板机翼等入射时, 在边缘产生边缘绕射场。

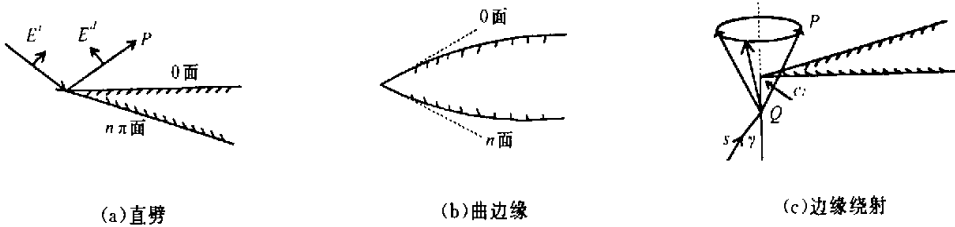


图 3 边缘射线场示意图

对直边缘, 如图 3(a)所示, 两劈面夹角为  $(2-n)\pi$ ; 平板是直边缘  $n=1$  的特例; 曲边缘如图 3(b)所示, 两曲边缘的切平面为  $\varphi=0, \varphi=n\pi$ 。如图 3(c)所示, 当电磁波向边缘  $L$  入射时, 设入射线  $S$  与边缘  $L$  的交点为  $Q$ , 夹角为  $\gamma$ , 则边缘绕射线必在以  $L$  为轴, 顶点为  $Q$ , 半锥角为  $\gamma$  的锥面上。

采用射线基坐标系, 可得场点  $P$  的边缘绕射场为<sup>[3]</sup>:

$$\tilde{E}^d(P) = \tilde{E}(Q) \cdot \tilde{D} \sqrt{\rho_s/S \cdot (S + \rho_s)} e^{-jk s} \quad (8)$$

式中,  $\tilde{E}(Q)$  为  $Q$  点的人射场;  $\rho_s$  为反射射线波两主曲率半径之差

$$\rho_s = \frac{1}{\rho'_s} - \hat{n}_s(\hat{s}' - \hat{s})/\rho'_s \sin^2 \gamma$$

$\rho'_s$  为入射波面在  $\hat{s}' - \hat{s}$  平面的曲率半径;  $\tilde{D}$  为边缘绕射系数。一般是三阶方阵, 射线基坐标系下, 它是并矢(二阶方阵), 即:

$$D = \begin{pmatrix} -D_s & 0 \\ 0 & -D_h \end{pmatrix}$$

$D_s, D_h$  为软、硬边界情况的边缘绕射系数。当入射波为球面波(点源), 边缘为直半平面(机翼是有限半平面直边源)时, 一致性绕射系数  $D_s, D_h$  参见文献[1]。

上述各分量场是在各自射线基坐标系下的表达式, 求解总场时, 首先定义飞机几何直角坐标系作为任意矢量极化转换、极化表示的依据, 无论各分量射线场处于何种射线基坐标系, 最终都将分解为用直角坐标系表示的场分量, 然后再进行叠加求和, 即:

$$\begin{bmatrix} E_s \\ E_r \\ E_t \end{bmatrix} = \delta_s \begin{bmatrix} E_s \\ E_r \\ E_t \end{bmatrix} + \delta_p \begin{bmatrix} E_p \\ E_r \\ E_t \end{bmatrix} + \delta_{ed} \begin{bmatrix} E_{ed} \\ E_r \\ E_t \end{bmatrix} + \delta_{cd} \begin{bmatrix} E_{cd} \\ E_r \\ E_t \end{bmatrix} + \delta_{sc} \begin{bmatrix} E_{sc} \\ E_r \\ E_t \end{bmatrix} + \dots$$

式中  $\delta$  为判断因子,  $E_s$  为直射场,  $E_p$  为平板反射场,  $E_{ed}$  为边缘绕射场(包括曲边缘绕射场和二次绕射场),  $E_{cd}$  为曲面反射场,  $E_{sc}$  为曲面绕射场, 另外还包括反射反射、反射绕射、绕射绕射等二次及二次以上的散射分量场。

### 3 计算结果

根据以上分析编制了某型机载天线受扰方向特性分析预测程序, 该软件采用模块化结构, 可分析任意天线受载机影响辐射方向图。本文以单极子为例, 图 4(a)、(b)、(c) 是单极子安装在鼻翼处计算得到的方向图。图 5 是此位置处的立体方向图。由此曲线可直观看出机体对天线方向图的影响。

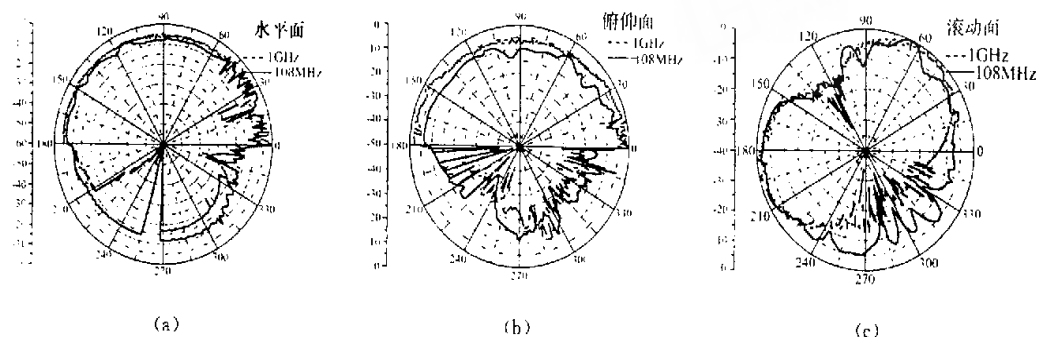


图 4 单极子方向图

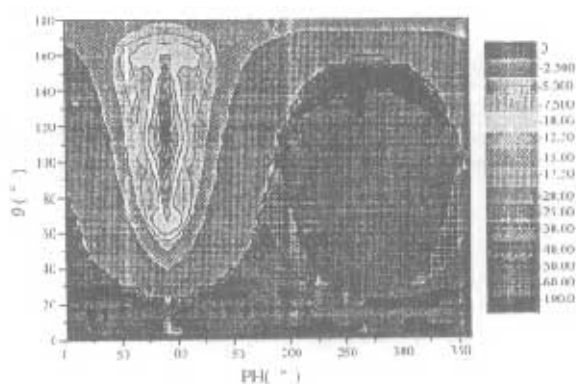


图 5 立体方向图

### 4 结束语

本文结合工程实际, 采用一致性几何绕射理论, 以单极子为例, 分析了载机对其上安装的天线辐射方向特性的影响, 编制了适合工程使用的软件, 调用不同天线数据模型, 可预测任意机载天线任意面方向图及空间立体方向图, 该软件可为工程设计中天线布局及位置优化提供理论参考。

#### 参 考 文 献

- [1] 江茂光. 几何绕射理论. 西安: 西安电子科技大学出版
- [2] Pathak, A Uniform GTD Solution for the Radiation from Sources, IEEE Trans, 1981, AP-29(4),

社, 1994.

- [3] Kouyoumjian. A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface. *Proceeding of IEEE*, 1974, 62(11).
- [4] W. D. Burnside, R. J. Marhefka, C. L. Yu. Roll plane analysis of on-aircraft antenna. *IEEE Trans.* AP-21 (11): 780~786
- [5] W. D. Burnside, M. C. Gilreath, R. J. Marhefka, C. L. Yu. A study of KC-135 aircraft antenna patterns. *IEEE Trans.* 1975, AP-23(5): 309~316.
- [6] C. L. Yu, W. D. Burnside, M. C. Gilreath. Volumetric pattern analysis of airborne antennas. *IEEE Trans.* 1978, AP-26(11): 623~641.
- [7] W. D. Burnside, N. Wang, E. Pelton. Near-Field Pattern Analysis of Airborne Antennas. *IEEE Trans.* 1980, AP-28(5): 318~327.

**曹祥玉** 女, 1964年生, 博士, 教授, 曾获国家科技进步三等奖(军队科技进步一等奖), 现在西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士后流动站。研究方向: 电磁场数值计算, 电磁兼容、电磁散射与逆散射。

**项铁铭** 男, 1977年生, 博士生。主要研究方向: 电磁场数值计算, 电磁兼容、电磁散射与逆散射。

**马凤国** 男, 博士。主要研究方向: 电磁场数值计算, 电磁兼容、电磁散射与逆散射。

**梁昌洪** 男, 1943年生, 现为西安电子科技大学校长, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, IEEE 高级会员。研究方向包括计算场论、计算微波、微波网络理论、近代数据处理、电磁散射与逆散射。

(上接第10页)

### 参 考 文 献

- [1] H. M. Aumann, A. J. Fenn, F. G. Willwerth. Phased array antenna calibration and pattern prediction using mutual coupling measurements. *IEEE Trans. AP*, 1989, 37(7): 844~850.
- [2] Charles Shipsey, Don Wood. Mutual coupling-based calibration of phased array antennas. *IEEE International conference on phased array system & technology*. 2000: 529~532.
- [3] Gao Tie, *et al.* Large active phased array antenna calibration using MCM. *IEEE AP-S 2001*: 606~609.
- [4] Gao Tie, Wang Jinyuan, *et al.* Large phased array antenna calibration using mutual coupling method. *International conference on Radar*, 2001: 223~226.
- [5] J. J. Lee, *et al.* Near-field probe used as a diagnostic tool to locate defective elements in an array antenna. *IEEE Trans. On AP*, 1988, 36(6): 884~889.
- [6] 胡鸿飞等. 基于FFT的近场-口径场变换方法. *微波学报*, 2001, 29(3): 1~6.
- [7] Daniel A. Leatherwood, *et al.* Time-Domain properties of phased array antenna. *IEEE International conference on phased array system & technology*. 2000: 25~28.
- [8] K. M. Lee, *et al.* A performance monitoring/fault and correction system of a phased array antenna using transmission-line signal injection with phase toggling method. *IEEE AP-S*, 1992: 429~432.
- [9] Nakato Kojima, *et al.* Measurement and evaluation techniques for an airborne active phased array antenna. *International conference on phased array*. 1996: 231~236.
- [10] Г. Г. 布勃诺夫. 相控阵天线特性换相测量法. 十四所, 1996.
- [11] J. J. Lee. Sidelobe control of solid-state array antenna. *IEEE Trans. AP*, 1988, 36(3): 339~344.
- [12] 高铁, 李建新. 固态有源相控阵天线多阶振幅量化及副瓣特性的研究. *电子学报*, 1994, 22(3): 11~17.
- [13] Li Jianxin, Gao Tie. Pattern statistic characteristic research for low sidelobe solid-state active phased array antenna. 1993 Asia-Pacific Microwave Conference., Taiwan, 1993, vol. 1: 42~45.

**高 铁** 1961年生于南京, 分别于1983年和1986年从南京理工大学获得电子工程专业学士和硕士学位, 现为南京电子技术研究所高级工程师, IEEE 会员, CIE 高级会员。主要从事固态有源相控阵天线设计及研究工作, 已在《电子学报》、国际雷达会议等期刊和会议上发表论文70余篇。

**王金元** 1976年生于山东潍坊, 1999年毕业于烟台大学应用数学专业并获学士学位, 同年入南京电子工程研究中心攻读硕士学位。主要从事相控阵天线的系统研究工作, 发表论文2篇。

## 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](http://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](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、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](http://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>