

ETC 相互作用对 NLC 实验中顶夸克对产生过程 CP 破坏的贡献*

岳崇兴^{1,1)} 杨正涛² 鲁公儒¹ 李卫彬¹ 孙俊峰¹

1 (河南师范大学物理与信息工程学院 新乡 453002)

2 (郑州大学物理系 郑州 450052)

摘要 在 Topcolor 辅助的多标度人工色 (TOPMTC) 模型框架下计算了扩充人工色 (ETC) 相互作用对顶夸克对产生过程中 CP 破坏参数 δ 的贡献 ($\delta = \frac{\sigma[e\bar{e} \rightarrow t(-)\bar{t}(-)] - \sigma[e\bar{e} \rightarrow t(+)\bar{t}(+)]}{\sigma(e\bar{e} \rightarrow t\bar{t})}$). 计算结果表明, 对于合理的参数取值, ETC 相互作用可对参数 δ 产生较大的修正 ($8.65 \times 10^{-3} \leq \delta \leq 1.09 \times 10^{-2}$). 期望在将来的 NLC 实验中能观测到此修正效应.

关键词 ETC 相互作用 顶夸克产生 CP 破坏参数 δ

1 引言

在电弱规范理论中, CP 破坏是一个具有挑战性的问题. 为了探索这个问题, 人们已经对 B 介子和 D 介子的衰变过程进行了详尽的研究. 现在, 人们正期待着 B 介子工厂能够给出大量的实验数据来研究 CP 破坏问题. 顶夸克是人们已发现的最重的粒子, 顶夸克产生的物理过程很可能是一个在下一代直线对撞机 (NLC) 上研究 CP 破坏问题的有效途径^[1].

由于顶夸克和其它代的混合很小, 以及来自 CIM 机制的压低, 标准模型中 CP 破坏的效应非常小, 以至于几乎在所有的对撞机实验上, 通过顶夸克产生的过程中都无法观测到标准模型的 CP 破坏效应^[2]. 因此, 顶夸克对新物理造成的 CP 破坏效应非常敏感, 它可作为研究新物理中 CP 破坏效应的一个有效探针. NLC 实验可通过正负电子对的湮没而产生大量的顶夸克, 故 NLC 将成为探索新物理的有力工具. 人们已在一些非标准模型框架下详细研究了 $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$ 过程中 CP 破坏效应^[3-5]. 本文将研究扩充人工色 (ETC) 相互作用对 $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$ 过程的 CP 破坏的贡献, 并且给出了 CP 破坏参数 δ 的量级估计.

为了使普通费米子获得质量, 人们提出了 ETC 理论^[6,7]. 但 ETC 理论很难在产生顶夸克的同时, 给出与弱电精确测量符合较好的理论预言. 为此人们把 ETC 相互作用同

1999-10-09 收稿, 1999-12-23 收修改稿

* 国家自然科学基金, 河南省杰出青年基金资助

1) E-mail: cxyue@public.xxptt.ha.cn

Topcolor 相互作用结合起来,提出了 Topcolor 辅助的人工色(TC2)理论^[8] TC2 理论是目前人们感兴趣的一种非标准模型理论,为此本文在此理论框架下讨论 ETC 相互作用对 CP 破坏的贡献.

在 NLC 实验中可产生大量的顶夸克对,其主要产生机制是通过正负电子对湮没在虚光子或者中性弱规范玻色子,然后这些虚、弱规范玻色子分裂成顶夸克对.

$$e^+e^- \rightarrow \gamma^*, \quad Z^0 \rightarrow t\bar{t}. \quad (1)$$

ETC 规范玻色子的交换能够对 $Zb\bar{b}, Zt\bar{t}$ 耦和产生有意义的修正^[9],因此 ETC 相互作用可以产生新的 CP 破坏效应. 本文第二部分给出了 ETC 规范玻色子的交换所产生的新的 $Zt\bar{t}$ 耦和形式. 此耦和依赖于 Topcolor 部分的参数 ϵ 和自由参数 ξ_L . 不过,我们用分支比 R_b 的最新实验测量值给出了对自由参数 ξ_L 的限制. 第三部分给出了 CP 破坏参数 δ 的计算公式. 第四部分给出了数值计算结果和由此得到的结论.

2 Topcolor 辅助的多标度人工色(TOPCMTC)模型产生的新 $Zt\bar{t}$ 耦和形式

TOPCMTC 模型是把 Topcolor 相互作用和简单的多标度人工色模型^[10]有机的结合在一起的复合模型. 此模型中的 Topcolor 部分和通常的 TC2 理论中的 Topcolor 部分一样,普通的轻夸克质量和轻子质量是由 ETC 相互作用产生的,顶夸克和底夸克的部分质量也是由 ETC 相互作用产生的. ETC 相互作用产生的顶夸克质量为 $m'_t = \epsilon \cdot m_t$. 其中, $0.03 \leq \epsilon \leq 0.1$ ^[8]. 下面讨论由 ETC 规范玻色子的交换而产生的新的 $Zb\bar{b}, Zt\bar{t}$ 耦和形式.

“旁路”ETC 规范玻色子的交换所产生的新的耦和形式可写为^[9]

$$\frac{g_E^2}{4M_S^2} \frac{F^2 e^2}{s_w c_w} \{Z_\mu [\xi_L^2 (\bar{b}_L \gamma^\mu b_L - \bar{t}_L \gamma^\mu t_L) + \xi_U^2 \bar{t}_R \gamma^\mu t_R - \xi_D^2 \bar{b}_R \gamma^\mu b_R]\}, \quad (2)$$

其中 M_S 是“旁路”ETC 规范玻色子的质量, F 是 TC 介子的衰变常数. $s_w = \sin\theta_w, c_w = \cos\theta_w, \theta_w$ 是温伯格角.

对于给定的人工色指标 N_{TC} , 可以通过将人工色费米子的旁路耦合乘以因子 $\frac{-1}{\sqrt{N_{TC}(N_{TC}+1)}}$ 而得到人工色费米子的对角耦合,对于普通费米子的对角耦合也可以通过其旁路耦合乘以因子 $\sqrt{N_{TC}(N_{TC}+1)}$ 而得到^[11]. 故“对角”ETC 规范玻色子的交换产生的新 $Zb\bar{b}, Zt\bar{t}$ 耦和形式可写为

$$\begin{aligned} \delta g_{tL}^b &= \frac{-1}{4} \frac{m'_t}{4\pi F} \frac{e}{s_w c_w} \sqrt{\frac{N_{TC}}{N_C}} \left[\left(\frac{M_S}{M_D} \right)^2 \frac{2N_C}{N_{TC}+1} \xi_L (\xi_U + \xi_D) - \xi_L^2 \right], \\ \delta g_{tR}^b &= \frac{-1}{4} \frac{m'_t}{4\pi F} \frac{e}{s_w c_w} \sqrt{\frac{N_{TC}}{N_C}} \left[\left(\frac{M_S}{M_D} \right)^2 \frac{2N_C}{N_{TC}+1} \xi_D (\xi_U + \xi_D) - \xi_D^2 \right], \\ \delta g_{tL}^t &= \frac{-1}{4} \frac{m'_t}{4\pi F} \frac{e}{s_w c_w} \sqrt{\frac{N_{TC}}{N_C}} \left[\left(\frac{M_S}{M_D} \right)^2 \frac{2N_C}{N_{TC}+1} \xi_L (\xi_U + \xi_D) + \xi_L^2 \right], \\ \delta g_{tR}^t &= \frac{-1}{4} \frac{m'_t}{4\pi F} \frac{e}{s_w c_w} \sqrt{\frac{N_{TC}}{N_C}} \left[\left(\frac{M_S}{M_D} \right)^2 \frac{2N_C}{N_{TC}+1} \xi_U (\xi_U + \xi_D) - \xi_U^2 \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

其中 M_D 是对角 ETC 规范玻色子的质量. 在以上几个方程中, 已用了关系式 $m'_i = \left(\frac{g_E^2}{M_S^2}\right) 4\pi F^3 \sqrt{\frac{N_{TC}}{N_C}}^{[12]}$. 由于在 TOPCMTC 模型中, 有关系式 $\xi_L \xi_U = 1$, $\xi_D = \xi_L^{-1}$ $\left(\frac{m_s}{m_c}\right)^{[12]}$. m_s, m_c 分别代表奇异夸克与粲夸克的质量. 因此上面几个方程可化简为

$$\begin{aligned}\delta g_{LE}^b &\simeq \frac{-1}{4} \frac{\epsilon m_t}{4\pi F} \frac{e}{s_w c_w} \sqrt{\frac{N_{TC}}{N_C}} \left(\frac{2N_C}{N_{TC} + 1} - \xi_L^2 \right), \quad \delta g_{RE}^b \simeq 0. \\ \delta g_{LE}^i &\simeq \frac{-1}{4} \frac{\epsilon m_t}{4\pi F} \frac{e}{s_w c_w} \sqrt{\frac{N_{TC}}{N_C}} \left(\frac{2N_C}{N_{TC} + 1} + \xi_L^2 \right), \\ \delta g_{RE}^i &\simeq \frac{-1}{4} \frac{\epsilon m_t}{4\pi F} \frac{e}{s_w c_w} \sqrt{\frac{N_{TC}}{N_C}} \left(\frac{2N_C}{N_{TC} + 1} - 1 \right) \xi_L^{-2}\end{aligned}$$

其中取 $M_S = M_D$, 并忽略了被因子 $\left(\frac{m_s}{m_c}\right)^2, \left(\frac{m_s}{m_c}\right)$ 压低的那些项.

从上面几个方程中, 可以看出 $Zb\bar{b}, Zt\bar{t}$ 耦合的新形式只依赖于 ϵ 和 ξ_L . 我们已经知道 ϵ 的变化范围是 $0.03 \leq \epsilon \leq 0.1$ ^[8]. 但是在 TOPCMTC 模型中, 对参量 ξ_L 没有任何的限制. 不过, 可以用 LEP 最新的 R_b 值对 ξ_L 进行限制

$$\delta R_b = R_b^{SM} (1 - R_b^{SM}) \frac{2g_L^b \delta g_L^b}{(g_L^b)^2 + (g_R^b)^2}, \quad (10)$$

其中 $\delta R_b = R_b^{exp} - R_b^{SM}$. 将方程(10)带到方程(8)和(9)中, 可以看出 $Zt\bar{t}$ 耦合的新形式只依赖于 Topcolor 部分的 ϵ 参量. 在下一部分, 将用 $Zt\bar{t}$ 耦合的新形式导出 CP 破坏参数 δ 的计算公式.

3 CP 破坏参数 δ 的计算公式

NLC 上产生的顶夸克对 ($t\bar{t}$) 是通过交换弱规范玻色子 (γ, Z) 产生的, 顶夸克和反顶夸克的手征性是一样的. 因此, 在顶夸克的质量远小于 NLC 质心能量 \sqrt{s} 的条件下, $t\bar{t}$ 的手征态将是 $(+ -)$ 或者 $(- +)$. 但是, 由于观测到的顶夸克质量比预计的大出了很多, 所以将会出现大量的 $(++)$, $(--)$ 态的顶夸克对. 这就使得我们能够通过对称参数 δ 来研究 CP 破坏的效应. 不对称参数 δ 的定义为

$$\delta = \frac{N(--)-N(++)}{N(\text{all})} = \frac{\sigma[e\bar{e} \rightarrow t(-)\bar{t}(-)] - \sigma[e\bar{e} \rightarrow t(+)\bar{t}(+)]}{\sigma(e\bar{e} \rightarrow t\bar{t})}, \quad (11)$$

其中 $\sigma(e\bar{e} \rightarrow t\bar{t}) = \sigma[e\bar{e} \rightarrow t(-)\bar{t}(-)] + \sigma[e\bar{e} \rightarrow t(-)\bar{t}(+)] + \sigma[e\bar{e} \rightarrow t(+)\bar{t}(-)] + \sigma[e\bar{e} \rightarrow t(+)\bar{t}(+)]$. NLC 上 $t\bar{t}$ 对的产生主要是通过 γ 或者 Z 的交换产生, 因此 CP 破坏参数 δ 同新的 $\gamma t\bar{t}, Zt\bar{t}$ 耦合形式相关. 包含标准模型(SM)和新物理效应的顶角 $Vt\bar{t}$ ($V = Z, \gamma$) 可以写成

$$\Gamma_{Vt\bar{t}}^{\nu} = i \frac{g}{2} \left\{ \gamma^{\nu} [A_V + \delta A_V - (B_V + \delta B_V) \gamma_5] + \frac{P_t^{\nu} - P_{\bar{t}}^{\nu}}{2m_t} [C_V + \delta C_V - (D_V + \delta D_V) \gamma_5] \right\}, \quad (12)$$

其中 g 是 $SU(2)$ 的规范耦合常数. 形状因子 $A_\nu, B_\nu, C_\nu, D_\nu$ 是标准模型的贡献量. 在树图时, 只有 $A_{\gamma,z}, B_z$ 不为零, 标准模型圈图仅对形状因子 D_ν 有贡献, 但其贡献非常小, 可以忽略^[2] 因此有

$$A_\gamma = \frac{4}{3}s_w, B_\gamma = 0, C_\gamma = C_z = D_\gamma = D_z = 0, \quad (13)$$

$$A_z = \frac{1}{2c_w} \left(1 - \frac{8}{3}s_w^2 \right), B_z = \frac{1}{2c_w}. \quad (14)$$

其中 $\delta A_\nu, \delta B_\nu, \delta C_\nu, \delta D_\nu$ 是来自新物理的贡献 ETC 相互作用对 $\gamma b\bar{b}, \gamma t\bar{t}$ 耦合没有贡献^[13], 因此有

$$\delta A_\gamma = \delta B_\gamma = 0. \quad (15)$$

从方程(8)和(9), 可以得到

$$\delta A_z = \frac{\epsilon m_t}{16\pi F} \frac{1}{c_w} \sqrt{\frac{N_{TC}}{N_C}} \left[\frac{2N_C}{N_{TC} + 1} + \xi_L^2 + \left(\frac{2N_C}{N_{TC} + 1} - 1 \right) \xi_L^{-2} \right], \quad (16)$$

$$\delta B_z = \frac{\epsilon m_t}{16\pi F} \frac{1}{c_w} \sqrt{\frac{N_{TC}}{N_C}} \left[\frac{2N_C}{N_{TC} + 1} + \xi_L^2 - \left(\frac{2N_C}{N_{TC} + 1} - 1 \right) \xi_L^{-2} \right], \quad (17)$$

按照有效拉格朗日方法, $\delta C_\nu, \delta D_\nu$ 都是小量 $O\left(\frac{m_t^2}{g\Lambda^2}\right)$ (Λ 是新物理的能量标度), 且有 $\Lambda \sim \frac{m_t}{\sqrt{g\delta_\nu}}$ ($\delta_\nu = \delta C_\nu, \delta D_\nu$)^[14]. 对于 TOPCMTC 模型, 若假设 ETC 相互作用的能量标度 Λ 是 2.5TeV, 则有^[15]

$$\delta C_\nu \simeq \delta D_\nu = \delta D \simeq 0.01 \quad (18)$$

与文献^[15]类似, 可以用顶夸克对的微分散射截面计算 CP 破坏参数 δ , 由此得到:

$$\delta = 2\beta \left[D_s - \frac{\beta_s^2}{m_t^2} D_p \right] \left[(3 - \beta^2) D_\nu + 2\beta^2 (D_A - D_s) + \frac{\beta_s^2}{m_t^2} D_p \right]^{-1}, \quad (19)$$

其中 $\beta = \sqrt{1 - \frac{4m_t^2}{s}}$, \sqrt{s} 为质心能量, 以及

$$D_s = \{ [A_\gamma - \nu_e d(A_z + \delta A_z)](1 - \nu_e d) + d^2(A_z + \delta A_z) \} \delta D, \quad (20)$$

$$D_p = \frac{1}{4} [(1 - \nu_e d)^2 + d^2] (\delta D)^2, \quad (21)$$

$$D_\nu = [A_\gamma - \nu_e d(A_z + \delta A_z)]^2 + [d(A_z + \delta A_z)]^2 \quad (22)$$

$$D_A = (\nu_e^2 + 1) d^2 (B_z + \delta B_z)^2, \quad (23)$$

$$\nu_e = -1 + 4s_w^2, d = \frac{1}{4s_w c_w} \frac{s}{s - m_z^2}. \quad (24)$$

4 数值计算和结论

用上述公式, 可以计算 CP 破坏参数 δ 的数值. 在进行数值计算之前, 需要给出所涉及的参量值. 取标准模型的参量为: $s_w^2 = 0.2315$, $m_t = 175\text{GeV}$ 和 $m_z =$

91.867GeV^[16]. 在 TOPCMTC 模型中, 取 $F = 40\text{GeV}$, $N_{TC} = 6$, $0.03 \leq \epsilon \leq 0.1$ ^[12]. 人工色部分的自由参数 ξ_L 可以通过 $\delta R_b [= R_b^{\text{exp}} - R_b^{\text{SM}}]$ 来限制. 由于 R_b 的 LEP 值在不断的变化, 因此把 δR_b 作为一个自由参数. 最近的实验测量值 $R_b^{\text{exp}} = 0.21656 \pm 0.00074$ 比标准模型的预言值 $R_b^{\text{SM}} = 0.2158 \pm 0.0002$ 大一个标准偏差^[16]. 因此, 可以认为 δR_b 的取值范围为 $0 - 1.7 \times 10^{-3}$.

为了更清晰的了解 ϵ 对参数 δ 值的影响. 图 1 表示当质心能量 \sqrt{s} 取 500GeV 时, δ 随 ϵ 变化的曲线. 从图可以看出: (a) δ 的值随 ϵ 的增大而减小; (b) 参数 δ 并不强烈依赖于 δR_b 的取值. (c) 当 $\epsilon = 0.05$ 时, 若取 $\delta R_b = 7.6 \times 10^{-4}$, 则 δ 约为 8.73×10^{-3} . 图 2 表示, 当 δR_b 为 7.6×10^{-4} 时, δ 值随质心能量 \sqrt{s} 变化的曲线. 从图 2 可以看出 δ 对 \sqrt{s} 有很强的依赖性. 当 \sqrt{s} 在 500GeV—1500GeV 范围内变化时, δ 的值在 $8.65 \times 10^{-3} - 1.09 \times 10^{-2}$ 范围内.

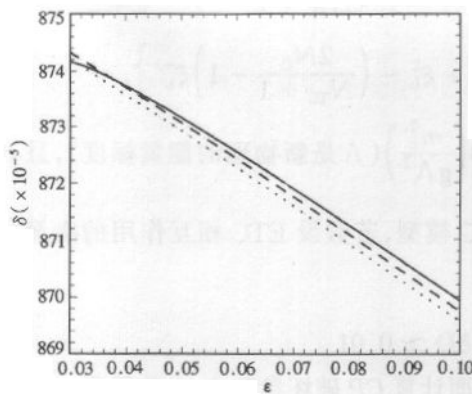


图 1 CP 破坏参数 δ 随 ϵ 变化的曲线图
质心能量 $\sqrt{s} = 500\text{GeV}$. — $\delta R_b = 1.7 \times 10^{-3}$,
- - - $\delta R_b = 7.6 \times 10^{-4}$, $\delta R_b = C$.

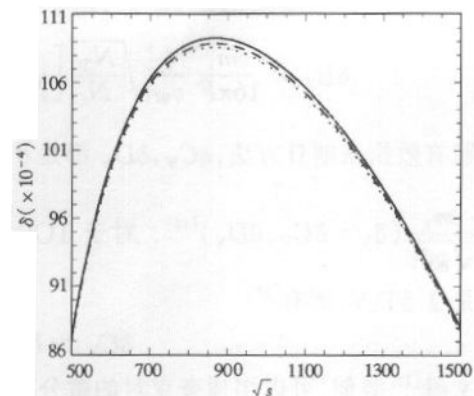


图 2 CP 破坏参数 δ 随质心能量 \sqrt{s} 变化的曲线
 $\delta R_b = 7.6 \times 10^{-4}$. — $\epsilon = 0.05$, - - - $\epsilon = 0.08$,
..... $\epsilon = 0.1$.

综上所述, 我们在 TOPCMTC 模型框架下, 研究 ETC 相互作用对 CP 破坏参数 δ 的贡献. 用 R_b 最新测量值, 计算出 δ 值. 结果表明在合理的参数取值范围内, ETC 相互作用能够产生较大的 CP 破坏效应. 我们期望在将来的 NLC 实验中能观测到此修正效应.

参考文献 (References)

- 1 Berenreuther W et al. Nucl. Phys., 1992, **B388**:53; Cuypers F, Rindani S D. Phys. Lett., 1995, **B343**:333; Grzadkowski B, Hioki Z. Nucl. Phys., 1997, **B484**:17; Baek M S et al. Phys. Rev., 1997, **D56**:6835
- 2 Jarlskog C. Phys. Rev., 1987, **D35**:1685; Jarlskog C, Stora R. Phys. Lett., 1988, **B208**:268; Eilam G et al. Phys. Rev. Lett., 1991, **B67**:1979; Grzadkowski B. Phys. Lett., 1993, **B319**:526
- 3 Schmidt C R, Peskin M E. Phys. Rev. Lett., 1992, **B69**:410; Chang D et al. Nucl. Phys., 1993, **B408**:286; 1994, **B429**:255; Arens T, Sehgal L M. Phys. Rev., 1994, **D50**:4372
- 4 Kane G L et al. Phys. Rev., 1992, **D45**:124; YANG J M, YOUNG B L. Phys. Rev., 1997, **D56**:5907; Bartl A et al. Phys. Rev., 1999, **D59**:077503

- 5 Gradkowski B et al. Phys. Rev. ,1998, **D58**:035002; Hioki Z, Ohkuma K. Phys. Rev. ,1999, **D59**:073503
- 6 Weiberg S. Phys. Rev. ,1976, **D13**:974; 1979, **D19**:1277; Susskind L. Phys. Rev. ,1979, **D20**:2617
- 7 Dimopoulos S, Susskind L. Nucl. Phys. ,1979, **B155**:237; Eichten E, Lane K. Phys. Lett. ,1980, **B90**:125
- 8 Hill C T. Phys. Lett. ,1995, **B345**:483; Lane K, Eichten E. Phys. Lett. ,1995, **B352**:382
- 9 YUE ChongXing, KUANG YuPing, LU GongRu et al. Phys. Rev. ,1995, **D52**:5314; YUE ChongXing, KUANG YuPing, LU GongRu. Phys. Rev. ,1997, **D56**:291; Mahanta U. Phys. Lett. ,1997, **B392**:145
- 10 Appeluist T et al. Phys. Lett. ,1989, **B220**:223; Chivukula R S et al. Nucl. Phys. ,1990, **B343**:554
- 11 Kitazawa N. Phys. Lett. ,1993, **B313**:393
- 12 YUE ChongXing, KUANG YuPing, LU GongRu. J. Phys. ,1997, **G23**:163
- 13 Mahanta U. Phys. Rev. ,1995, **D51**:3557
- 14 Whisnau K, YONG J M, YOUNG B L et al. Phys. Rev. ,1997, **D56**:467
- 15 SU Y et al. Phys. Lett. ,1997, **B79**:4075
- 16 Erler J, Langacker P. Status of the Standard Model, UR0816 - T, hep-ph/9809352

ETC Interactions and CP Violation in Top Quark Pair Production at the Next Linear Collider *

YUE ChongXing^{1,1)} YANG ZhengTao² LU GongRu¹
LI WeiBin¹ SUN JunFeng¹

¹ (Physics and Information Engineering Collage, Henan Normal University, Xingxiang 453002, China)

² (Department of Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract We calculate the contributions of extended technicolor (ETC) interaction to CP violation asymmetry parameter δ in top quark pair Production, $\delta = \frac{\sigma[e\bar{e} \rightarrow t(-)\bar{t}(-)] - \sigma[e\bar{e} \rightarrow t(+)\bar{t}(+)]}{\sigma(e\bar{e} \rightarrow t\bar{t})}$, in topcolor-assisted multiscale technicolor (TOPCMTC) model. Using the new LEP value of R_b , we give the numerical results. Our results show that ETC interactions can produce significantly effects on CP violation for a certain range of the parameters in TOPCMTC model. For $500\text{GeV} \leq \sqrt{s} \leq 1500\text{GeV}$, the value of parameter δ is in the range of $8.65 \times 10^{-3} \leq \delta \leq 1.09 \times 10^{-2}$. We expect that this effect may be testable in the future NLC experiments.

Key words ETC interactions, top quark pair production, the CP violation asymmetry parameter δ

Received 9 October 1999, Revised 23 December 1999

* Supported by National Natural Science Foundation of China and the Excellent Youth Foundation of Henan Scientific Committee

1) E-mail: cxyue@public.xpht.ha.cn